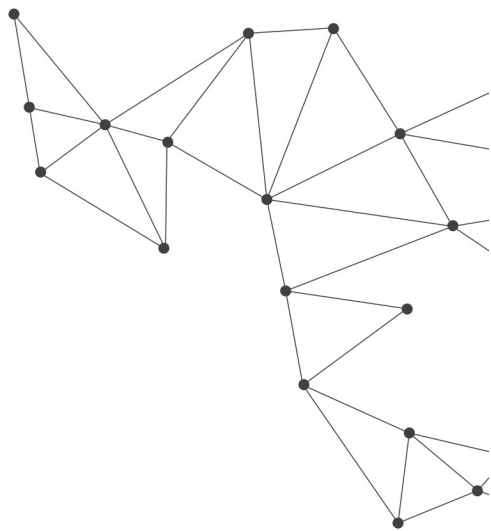


宇宙之美

物理学新探索

巩晓阳 著



電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

据调查,欧美等发达国家对宇宙学的认识和科普非常广泛,甚至小学生都能对宇宙有基本的认知。近几年,随着我国航空航天事业的飞速发展,年轻人更需要了解宇宙科学,并培养对宇宙的兴趣。只有大批青年人对宇宙充满好奇和兴趣,并投身于它的研究中,我们的科技才能进步。本书内容分为三大部分:地外生命、黑洞、虫洞。本书建立在物理学理论上,用通俗的语言介绍深奥的道理,包含牛顿力学在宇宙探索中的成就、宇宙的起源、恒星的演化、广义相对论的理论、虫洞研究的理论与困难等内容,旨在把物理学研究宇宙方面的新成果和前沿知识一一呈现给读者。

本书是一本科普读物,可作为大学公选课教材,也适合对物理学和宇宙学感兴趣的读者阅读,尤其是具备一定物理学知识的学生、教师和科研人员。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

宇宙之美:物理学新探索/巩晓阳著. —北京:电子工业出版社, 2018.5
ISBN 978-7-121-33884-7

I. ①宇… II. ①巩… III. ①物理学—普及读物 IV. ①O4-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 055802 号

策划编辑:戴晨辰

责任编辑:戴晨辰 文字编辑:刘 瑀

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:12.75 字数:168.3 千字

版 次:2018 年 5 月第 1 版

印 次:2018 年 5 月第 1 次印刷

定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: dcc@phei.com.cn。

前 言

PREFACE

美国物理学家、著名教育家、2017 年诺贝尔物理学奖获得者基普·索恩的导师约翰·惠勒曾说过：“要想了解一个新的领域，就去开一门这个领域的课程。”“要想了解一个新的领域，就写一本关于那个领域的书。”“大学里为什么要有学生，那是因为老师有不懂的东西，需要学生来帮助解答。”读到这几句话，我心里甚是感动，因为此书的成书过程基本上就是这样的。

我对地外生命课题关注得比较早。大约是在 1993 年，有幸聆听了北大著名物理学教授赵凯华先生的一次关于地外生命的讲座，从此便开始关注这方面的相关成就。

作为一名高校教师，兢兢业业地教书和做些相关方面的研究一直是我的日常，然而转折来自 2011 年对本学院相关专业（应用物理、材料物理）学生的一次调查。调查结果显示，学生最感兴趣的物理学前沿课题中，虫洞的名字赫然在榜，一下子让我这个从教 20 余年的教师很惭愧，因为当时虫洞对于我来说也仅仅停留在概念层面上。于是，我开始读书，记笔记，整理，理解……

当我终于开始觉得有把握用自己的思路来理解黑洞和虫洞的相关问题时，就开始准备教案和课件，并开设了全校公选课“物理学引领我们探索宇宙”。

课程进行得比较成功，每次选课的学生数量都是最多的，一名动物科学专业的学生曾在课后和我交谈说：“老师，我觉得大学里就应该开设像广义相对论这样高大上的课程。”我的回答是：“这话也对也不对，大学里为了拓宽思路、开阔眼界，开设一些前沿的课程是好的，但是没有经典物理、量子力学、狭义相对论等作为基础，学习广义相对论也仅仅是概念而已。如果基础课程打牢，你会发现，利用一定的知识，广义相对论的结论可以顺理成章地推导出来，那么它就不再高大上了。但是，高大上的理论还有吗？有，它在你的前方，指引着你继续探索研究，物理学也就继续向前迈进了！”

这些求知的学生多可爱！为了这些热爱科学、热爱学习的学生，我不仅要讲好课，也萌生了把自己的理解条理化、通俗化，编写成书，并与对此方面感兴趣的读者共勉的心愿。

由于笔者水平有限，书中难免有错误之处，欢迎读者批评指正！

巩晓阳
于河南科技大学

目 录

CONTENTS

| | |
|------------------------|----|
| 第一部分 地外生命 | 1 |
| 第一节 探索地外生命的方法与进程 | 4 |
| 一、射电监听 | 5 |
| 二、地球信使 | 12 |
| 第二节 生命存在的条件 | 19 |
| 第三节 太阳系内地外生命的探索 | 23 |
| 一、类地行星 | 26 |
| 二、类木行星 | 36 |
| 三、冥王星 | 47 |
| 四、小行星带 | 50 |
| 第四节 太阳系外地外生命的探索 | 53 |
| 一、对类太阳系系统的探测 | 53 |
| 二、对类地行星的探测 | 54 |

| | |
|-----------------|-----|
| 第五节 地外生命探索的畅想 | 57 |
| 一、费米悖论与绿岸公式 | 57 |
| 二、生命存在模式 | 58 |
| 三、探索地外生命的畅想 | 59 |
| 第二部分 黑洞 | 63 |
| 第一节 宇与宙 | 67 |
| 第二节 恒星演化，走向黑洞 | 72 |
| 一、赫罗图 | 72 |
| 二、恒星的能量 | 76 |
| 三、恒星演化过程 | 78 |
| 四、钱德拉塞卡与钱德拉塞卡极限 | 84 |
| 五、奥本海默和奥本海默极限 | 87 |
| 六、天狼星——白矮星的发现 | 90 |
| 七、中子星——预言与发现 | 92 |
| 八、恒星演化——走向黑洞 | 94 |
| 九、关心我们的太阳 | 96 |
| 第三节 广义相对论，走向黑洞 | 98 |
| 一、经典物理学的困难 | 98 |
| 二、迈克尔逊干涉仪 | 100 |
| 三、狭义相对论的成就与困难 | 104 |
| 四、广义相对性原理与马赫原理 | 110 |
| 五、引力质量与惯性质量 | 114 |
| 六、等效原理和局部惯性系 | 116 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 七、走向广义相对论····· | 121 |
| 八、广义相对论的场方程····· | 125 |
| 九、如何理解时空弯曲····· | 126 |
| 十、广义相对论的实验验证····· | 129 |
| 十一、从广义相对论走向黑洞····· | 134 |
| 第四节 黑洞的性质及观测方法····· | 138 |
| 一、黑洞的性质····· | 138 |
| 二、黑洞的观测方法····· | 139 |
| 三、黑洞的类型····· | 143 |
| 第五节 结束语····· | 145 |
| 第三部分 虫洞····· | 149 |
| 第一节 从广义相对论到虫洞与白洞····· | 150 |
| 一、爱因斯坦-罗森桥····· | 150 |
| 二、白洞的预言····· | 153 |
| 三、黑洞作为星际旅行通道的缺陷····· | 155 |
| 第二节 从科幻小说到虫洞····· | 156 |
| 第三节 物理学理论中的虫洞····· | 160 |
| 一、虫洞名字的创造者——惠勒····· | 160 |
| 二、索恩的虫洞研究····· | 162 |
| 三、洛伦兹虫洞和欧几里得虫洞····· | 164 |
| 四、理论计算出的虫洞解····· | 165 |
| 五、负能物质····· | 167 |
| 六、负能物质的理论与实验验证····· | 170 |

| | |
|----------------------|-----|
| 第四节 构建虫洞 | 174 |
| 一、构建虫洞的物理学模型 | 174 |
| 二、薄层近似下奇异物质的数量 | 175 |
| 三、薄层近似下虫洞的应力分析 | 176 |
| 四、实现虫洞穿越的其他设想 | 181 |
| 五、构建虫洞面临的其他困难 | 183 |
| 第五节 由虫洞到时间机器 | 186 |
| 一、构筑时间机器 | 187 |
| 二、时间机器引起的悖论 | 189 |
| 三、解决悖论的方法 | 190 |
| 参考文献 | 194 |

第一部分
PART

1

地外生命



精讲视频

地球以外是否存在生命？地球是目前唯一已知有智慧生命和文明存在的星球，然而在太阳系之内，在银河系的千亿颗恒星周围，在银河系外的茫茫宇宙之中，难道就再也找不到其他生命乃至文明了吗？对这个问题无论给出肯定或否定的答案都会令人惊异！近几十年间，不断有各种不明飞行物（Unidentified Flying Object, UFO）出现的报道，如图 1-1 所示。20 世纪 40 年代，美国上空发现碟状飞行物，当时的报纸把它称为“飞碟”，这是人类对 UFO 兴趣的开端，后来人们着眼于世界各地的 UFO 报道，但至今尚未发现能让科学界普遍接受的证据。一些 UFO 照片经专家鉴定为骗局，有的则被认为是球状闪电或其他自然现象，95% 以上肯定不是“外星人”飞船！但始终有部分发现根据现存科学知识无法解释，所以我们有理由相信在偌大的宇宙中有其他文明，甚至是比人类更高级、更智慧的文明存在。随着物理学和现代科学技术的发展，人类对地外生命的探索也逐渐有了科学的依据和实质性的进展。



图 1-1 不明飞行物

本部分通过介绍探索地外生命的方法与进程、生命存在的条件、太阳系内外地外生命的探索和对地外生命探索的畅想几部分，从物理学的角度讲述人类探索地外生命的过程与进展。同时，尽管本章以地外生命命名，但主线是人类对地球以外生命的探索，也介绍了探索过程中的其他科学发现，包括太阳系和太阳系内各大行星及卫星的情况，旨在使读者能对宇宙探索（主要是太阳系内的探索）中的各个方面有相对全面的了解。

第一节 探索地外生命的方法与进程

地球以外是否存在生命？我们先从广泛的范围考虑，即不仅局限于太阳系。生命的问题可以有很多层次，生命可以是低级的、原始的，也可以是高级的、像人类一样智慧的生命，而智慧的生命创造了地外文明。

地球诞生于 46 亿年前，经过几百万年的演化，大气中的无机物相互结合，再与原始大海中的物质结合，形成了有机物；之后又经过数亿年，氨基酸相互结合形成了蛋白质，很多核苷酸结合在一起形成了多聚核苷酸（即有自我复制功能的 RNA）；又经过几亿年的进化过程，RNA 和蛋白质进行结合，出现了 DNA；距今 38 亿年前，厌氧性原核细胞诞生，蓝藻通过光合作用开始制造氧气，从而出现真核细胞；又经过 10 亿年的进化后，真核细胞成为真核生物，然后变成单细胞生物和多细胞生物，陆地生物出现。地球经过几亿年的演化，逐步形成一个生物圈，出现从低级到高级的智慧生命，然后有了人类五千年的文明历史。这种现象在偌大的宇宙中，是不是唯一的？我们都不相信这是唯一的，总觉得宇宙之大，在其他地方也有可能存在地外生命，甚至更高级、更发达的地外文明。地外生命在过去只能是一些猜想或传说，而各种传说不能作为科学的论断。但最近几十年来，科学技术的高度发展使人类可以对这个问题进行更深入的探索。

物理学的发展让我们对宇宙的起源越来越清晰，按“大爆炸理论”，宇宙起源于 137 亿年前高温高密的“原始火球”的爆炸，那么在 137 亿年的宇宙进化过程中，不同地方有不同的进化进程，地球 46 亿年的年龄只是小字辈，浩瀚宇宙、茫茫时间长河，其他地方有生命乃至智慧生命也在情理之中。

我们和地外文明的联系分为两个方面。最初可能是与假想的地外文明进行通信联系，即是否能收到一些地外文明向我们发射的信号，或我们也主动

地向想象中的地外文明发射一些信号。进一步就是航天技术的发展，使我们可以向宇宙发射一些探测器，但这些探测器只能在太阳系内进行比较详细的探测。1957年10月，苏联第一颗探测卫星的发射开辟了宇航时代。经过几十年的发展，我们对太阳系内其他的几个近邻都有了非常具体的了解。探测器登陆进行实地考察，直接拍摄照片、测量数据，这些内容被高度清晰地发送回来，使我们获得了很多具体的资料。根据这些资料，就能够立足于科学来讨论地外生命的问题。

一、射电监听

人类是从20世纪60年代开始与外界有一些联系的，最早可以追溯到1960年美国实施的“奥兹玛计划”（Project Ozma）。奥兹玛计划是康奈尔大学的天文学家法兰克·德雷克在美国国家无线电天文台使用位于西弗吉尼亚的绿堤电波望远镜所从事的早期搜寻地外文明的计划（SETI），计划的目的是通过无线电波搜寻邻近太阳系的生物标志信号，如图1-2所示。



图 1-2 天文学家法兰克·德雷克和绿堤电波望远镜

实验采用了射电望远镜，射电望远镜实际上是一个大的天线，是主要接收天体射电波段辐射的望远镜，可以接收来自太空中的无线电信号。其接收的信号源包括肉眼可以看见的星星，或者是外太空的人造卫星，这些天体会发射不同波长的无线电信号。当时采用的射电望远镜直径为 26m，对准宇宙中的一个目标，查看在 3 个月内能否接收到信息。实验选择 21cm 的波段，为什么是 21cm 的波段呢？这来源于一个猜测：宇宙中氢（H）元素的含量最为丰富，占 3/4（1/4 是氦，其他元素可能不到 1%），氢元素在无线波段的共振频率是 21cm 的波段，如果地外文明也能想到这一点，就会用这个波段来发射，我们正好接收。因此，国际上规定 21cm 的波段为天文学专用。之后我们多次对近距离恒星进行信号发射与监听，但没有收到任何回音。1974 年，美国在波多黎各的阿雷西博天文台，用当时世界上最大的射电望远镜，向武仙座球状星团 M13 发射无线电信号 3 分钟。该射电望远镜直径为 305m，方向性强，是一个抛物面，波段不太宽（太宽需要的能量大很多），不能转动，只能观测一个约 20° 角的带状区域。可是此星座离我们太远（2.4 万光年），即使真的有，也需 4.8 万年后才能收到回音。

射电天文学的蓬勃发展，促使人们用射电的方法寻找难以想象的地外文明。科学家们认为，如果地外生命试图与我们接触，在“他们”的信号中加入一些有意义的信息，那么该信号几乎可以肯定为脉冲信号。在宇宙中，存在很多电磁波，但是绝大多数自然界的电磁波是杂乱无章的，较有规律的脉冲可能是脉冲星或黑洞发出的，另一个可能性就是地外生命发出的。因为脉冲星发出的电磁波频率非常高，而理论上黑洞发出来的脉冲过于短促，人类暂时无法探测到。所以，一系列的脉冲可以很容易地被分辨出来，具有离散抵消机制的脉冲明显是人造信号（自然的离散通常造成高频先到）。如果能找到这样的脉冲信号，几乎就能肯定外星人正在试图接触我们。

射电天文设备包括单独的射电望远镜或组成阵列的射电望远镜、灵敏的

射电探测器、处理收到的信息资料的电子设备等。为了探索地外文明，也为了与地外智慧生命联络通信，应用射电望远镜是最佳的方法。因为这种方法比较廉价，大量的信息能够以最小的代价得以发送和接收，且这种方法最快速有效，使恒星间的“对话”成为可能。

1967年，英国剑桥大学女研究生贝尔，用射电天线接收外来信号，得到了一个等间隔（1.337s）的脉冲信号，间隔非常均匀，贝尔和她的导师休伊什猜测，这么均匀的信号可能是宇宙中的外星人在发报，并将其称为小绿人（Little Green Man, LGM），如图 1-3 所示。很快人们便意识到并非如此，而是被称为脉冲星的天体在定期向我们发射无线电波，但为什么有如此均匀的间隔呢？



图 1-3 贝尔与休伊什

恒星和我们的地球一样，也在自转着，其自转轴和磁场方向不在一条直线上。每自转一周，它的磁场就在空间中画一个圆，扫过地球一次，转过去后就收不到了。我们设想在物理上只有星体的自转角动量守恒，转动惯量不

变，可以认为 1.337s 就是天体转动的周期。但有的星体基本上有太阳那么大，若 1s 左右自转一圈，它的角速度是多少？可能吗？

后来，人们又发现了许多脉冲星，比小绿人快得多，其中最著名的是蟹状星云，如图 1-4 所示。1731 年，一位英国人用望远镜在南方夜空的金牛星座上发现了一团云雾状的东西，外形像螃蟹，人们称它为“蟹状星云”（Crab Nebula）。蟹状星云的核心每秒转 30 次，周期为 0.033s。

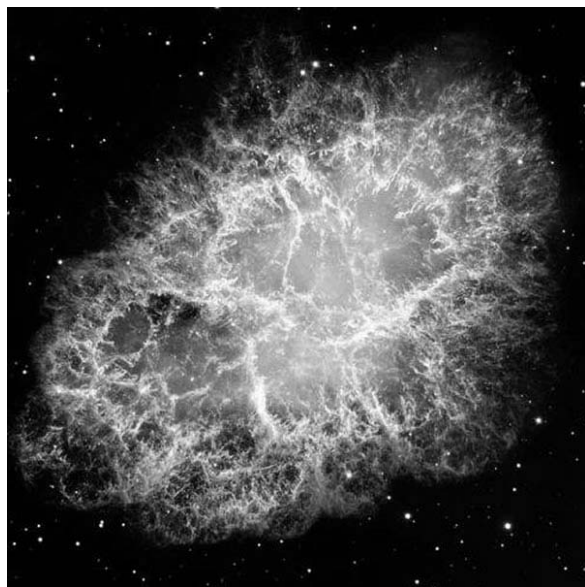


图 1-4 哈勃望远镜拍摄到的蟹状星云

按物理规律，星体转动时，其万有引力与惯性离心力相等，维持平衡。惯性离心力正比于转速的平方，转速越高，惯性离心力越大；万有引力与质量成正比，转速越高，其质量也越大，而同等体积下密度大，质量也大，因此要求脉冲星是致密的。20 世纪 60 年代认识的白矮星属于致密星体，密度为 10^6g/cm^3 ，比重为 $10^6 \sim 10^8 \text{g/cm}^3$ 。计算结果表明，蟹状星云如果具有太阳的质量，其转动不被散掉，要具有的最低密度为 10^{11}g/cm^3 。那么它又是 by 什么组成的呢？

1932 年，核物理领域发现了中子，知道了原子核由质子和中子组成。此后，物理学家曾预言宇宙中很可能有超新星爆发之后形成的非常致密的星体，此星体纯粹由中子组成。第一个提出该想法的是苏联理论物理学家朗道（1962 年曾因氦的超流工作获得诺贝尔奖），后来有美国物理学家奥本海默（在第一颗原子弹制造中起重要作用，被称为“原子弹之父”）。他们曾在 20 世纪 30 年代预言中子星的密度最高可达 10^{14}g/cm^3 ，也就是脉冲星。进一步的观测表明，蟹状星云这只“螃蟹”正在膨胀，膨胀速度为 0.21 角秒/年。到了 1920 年，苏联科学家观测到它的半径达到 180 角秒。推算起来，它的膨胀应始于 857（ $=180/0.21$ ）年前，即公元 1063（ $=1920-857$ ）年左右。也就是说，该蟹状星云是在 900 年前产生的，它是超新星爆发时抛出来的气体壳层。为此，苏联科学家求助于有着古老文明的中国，而这一事实刚好在我国的史书中得到了证实。如图 1-5 所示，我国宋代古书《宋会要辑稿》记载：“嘉祐元年（1056 年）三月，司天监言，客星没，客去之兆也。初，至和元年（1054 年）五月晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”其意是说：1054 年，在金牛星附近出现亮光，白天看起来就比金星亮，历时 23 天，后来慢慢暗下来，直到 1056 年才消失。



图 1-5 古书《宋会要辑稿》

它为超新星爆发理论提供了坚实的依据，得到国际公认。同时，脉冲星作为中子星的一种，也为中子星的发现提供了有力的证据，休伊什也因此获得了 1974 年的诺贝尔物理学奖。

1985 年，美国哈佛大学天体物理学家保罗霍洛威领导了“太空多通道分

析”(META)计划,通过 800 多万个不同频率,自动地探测外星文明。由于波段增加了上万倍,相应的工作量也增加了,普查一次太空竟需 200~400 天。1992 年,美国又实施了寻找地外智慧生命的“凤凰计划”,利用当时最大的天文射电望远镜搜索宇宙中各类天体传来的不同波长的无线电信号。

自“奥兹玛计划”执行后,世界各国进行了数次射电搜索计划,遗憾的是,这些工作都没有任何结果,但科学家们有以下共识:一是生命很可能产生在地外“太阳类”系统中,因此,探索目标应放在类太阳系统的行星上;二是射电望远镜能“听到”的最好频率为 1000~10000MHz;三是如果我们想同其他星球建立联系,应该利用电磁波,因为它以光速进行传播。

值得一提的是,世界上许多国家建有射电望远镜,包括德国、法国、日本、澳大利亚等,而 2016 年 7 月 3 日,一个由中国科研人员和工程人员创造的世界天文奇迹——FAST 射电望远镜,进行了最后一块反射镜面的安装,标志着最新的世界最大的射电望远镜在我国诞生,如图 1-6 所示。这个具有 500m 口径的球面射电望远镜,犹如在天地间架起的一口“大锅”。为了寻找适合架这口“大锅”的地方,从 1994 年开始,专家们就在全中国 300 多个候选区域中筛选评比,最终锁定了得分第一、优势明显的贵州平塘“大窝凼”。大窝凼的球形洼地,与 FAST 的球面设计十分贴合,这使工程的土石开挖量,从平地状态的 3000 万方锐减到 54 万方。除此之外,大窝凼优良的排水性也成为其得天独厚的优势之一。大窝凼属于喀斯特地貌中的“峰丛洼地”,水流会顺着山石间的裂缝,透过沙石渗入地下。不仅如此,工程开建之初,设计者还规划了完善的地下排水管网系统,在大窝凼的山体间开凿出一个长 1120m,按 50 年一遇洪水规模设计的排洪隧道,直通山的背后。这样一个射电望远镜由 2000 块 15m^2 的反射镜面拼成,其外形与锅式卫星天线相似,面积相当于 30 个足球场,当之无愧地成为世界上最大的天文望远镜。

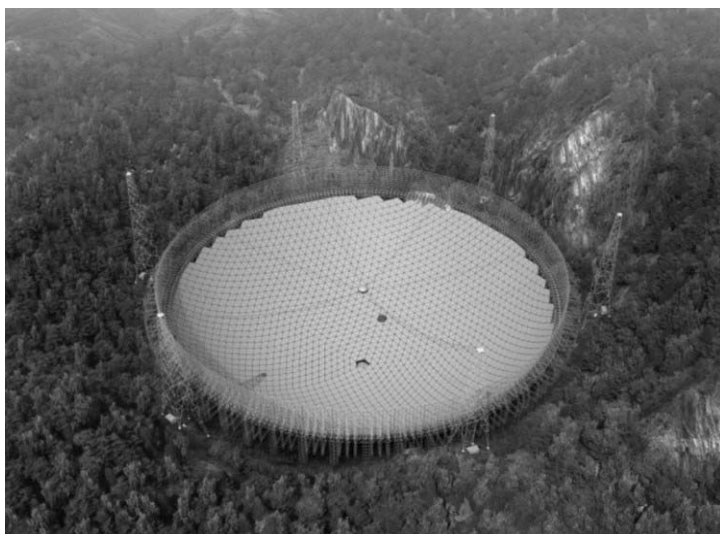


图 1-6 FAST

对于射电望远镜而言，灵敏度越高，望远镜探测微弱无线电的能力就越强。而想要提高灵敏度，就需要扩大射电望远镜的口径。FAST 突破了射电望远镜的百米极限，开创了建造巨型射电望远镜的新模式。它是目前国际上最大的单口径望远镜，与号称“地面最大的机器”的德国波恩 100m 望远镜相比，灵敏度提高约 10 倍；与排在阿波罗登月之前被评为人类 20 世纪十大工程之首的阿雷西博 305m 望远镜相比，它的可观测天空范围扩大 4 倍，灵敏度提高 2.3 倍，综合性能提高约 10 倍。FAST 最远接收距离为 137 亿光年，这个距离接近宇宙的边缘。FAST 射电望远镜的索网结构可以随着天体的移动变化，带动索网上的 4450 个反射单元，在射电电源方向形成 300m 口径的瞬时抛物面，极大地提升了观测效率。主动反射面让其拥有更广的观测范围，能覆盖 40° 的天顶角。FAST 射电望远镜的工作频率比较广，源舱内配置覆盖频率为 70MHz~3GHz 的多波段、多波束馈源和接收机系统。作为世界最大的单口径望远镜，FAST 拥有体型大、精度高、视野广三方面的优势，将在未来 20~30 年内保持世界一流设备的地位。

FAST 的重要功能之一就是探测遥远的“地外文明”，帮助人类监听外太空的宇宙射电波，其中包括可能来自其他智慧生命的“人工电波”。在电力充足的条件下，这只巨大的“天眼”还能发送电波信号，几万光年远的“外星朋友”将有可能收到来自中国的问候。当然，FAST 还肩负着巡视宇宙中的中性氢，为探索宇宙起源和演化、研究宇宙大尺度物理学提供资料，观测脉冲星，研究极端状态下的物质结构与物理规律等众多科学任务。

脉冲星、类星体、星际有机分子等重要天文发现都与射电望远镜有关，在诺贝尔奖历史上，明确基于天文观测的 10 项获奖成果中，就有 6 项出自射电望远镜。FAST 建成后，将搜寻到更多的奇异天体，观测到更多的宇宙奥秘，对于科学家一直寻找的地外文明，FAST 也将提供一个全新的观测平台。2017 年，建成一年的 FAST 已成功观测到 6 颗脉冲星。据新华社贵阳 2018 年 3 月 13 日电，FAST 自落成启用以来，共发现 11 颗脉冲星，其灵敏度之高名不虚传！

二、地球信使

在研究地外智慧生命存在的可能性的同时，科学家也在想办法与地外智慧生命取得联系。如何与地外文明取得联系呢？除技术和设备上的限制之外，时空屏障是最大的难题。空间问题是：最近的文明星球可能在 35 光年之外，即使用无线电联系，也要 70 年后得到回音；时间问题是：文明发展程度差异太大的星球是无法进行通信沟通的；另外还有语言问题，地外智慧生命长什么样？说什么话？听得懂人类语言吗？

美国导演斯皮尔伯格的著名电影《ET 外星人》中的外星生命形象就是来自科幻与假象。多数学者认为，宇宙语言只能用一种抽象的数学语言来表达。用“数”设计的语言，最简洁的就是二进制数（1 或 0），最好用“数”表达一幅图像，因为不仅是智慧生命甚至连低级动物也都有视力。

美国于 1972 年和 1973 年发射的先驱者 10 号和 11 号宇宙飞船，完成了

对木星和土星的探测，考察任务完成后，它们于 1988 年飞出了太阳系。希望有朝一日哪一个地外文明截住它们，获得我们地球的信息，所以这两艘飞船上都携带地球人自我介绍的名片，如图 1-7 所示。这块镀金铝质金属标志牌长 13.5cm，宽 7.5cm，厚 1.27mm。这张金属板按一定比例把地球在太阳系中的坐标、太阳系在银河系中的坐标，按二进制编码的形式发射出去。金属板上，有一个男人和一个女人站立在太空飞船前，男人做出问候的手势，这两个人是根据地球的人类特征绘制出来的。

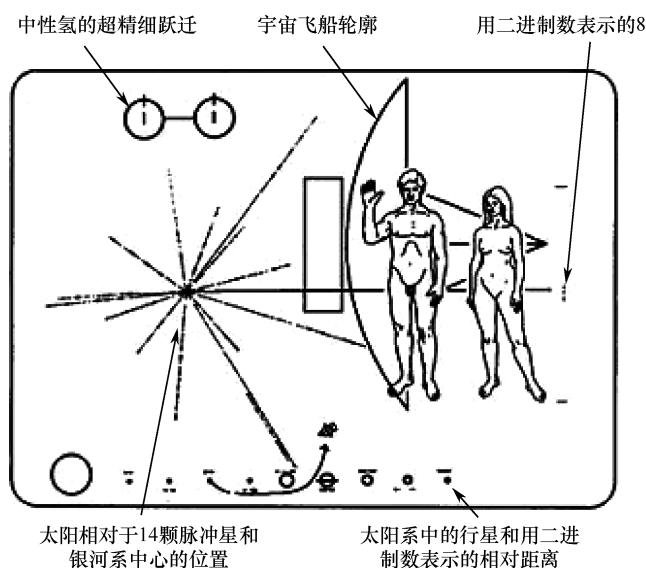


图 1-7 地球标志牌

20 世纪 50 年代到 70 年代是人类航天史上的黄金时代，1957 年第一颗人造卫星上天，1961 年第一个人类进入太空，1969 年第一艘载人飞船成功登月，一个个伟大成就接踵而来。对人类来说，需要一个更加激动人心的目标，向宇宙深处进发。与此同时，美国航天工程师加里·弗兰德发现，木星、土星、天王星、海王星 4 颗行星，将在 70 年代末出现在太阳的同一侧并呈几何排列，这意味着人类只需一次航行即可同时造访它们，它们巨大的引力还可以让航

天器获得加速度，原本 30 年的路程如今 12 年即可走完，所需要的燃料也将大大减少，而下一次出现这种排列将是在 176 年后，试问有哪个科学家会拒绝这样的机会？

作为航天霸主的美国人当然更无法拒绝，他们调集了 11000 名科学家、工程师，终于在 1977 年 8 月 20 日和 9 月 5 日将两个最新式的航天器分别送入太空，他们是一对重达 825kg 的孪生兄弟，分别名为 Voyager 1、Voyager 2，Voyager 意为航海家，在中文语境中我们更习惯称其为“旅行者 1 号”“旅行者 2 号”。虽然那个年代的技术与今天不可同日而语，但旅行者号也绝不可小觑，以它携带的相机为例，其分辨率让使用者可以从 1km 外看清报纸的标题。图 1-8 所示是旅行者号所携带的设备。

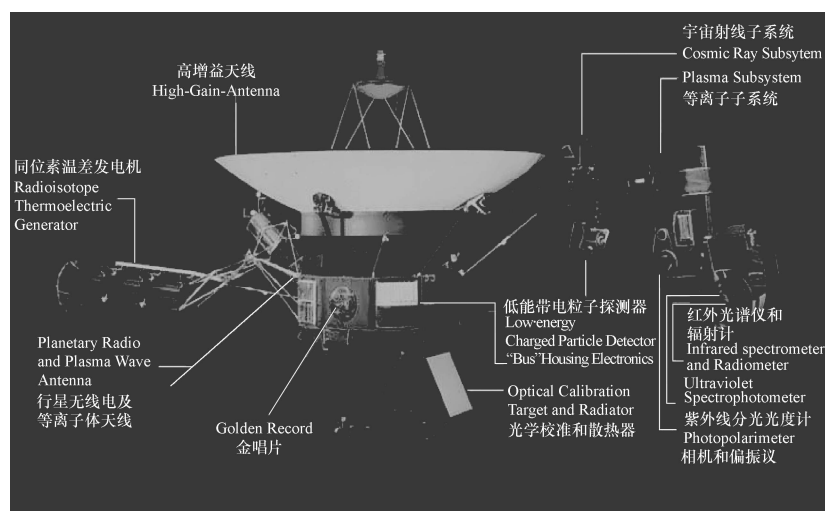


图 1-8 旅行者所携带的设备

两个航天器被设计了不同的路线，如图 1-9 所示，“旅行者 1 号”按照“木星—土星”的路线航行，之后离开黄道面（即太阳系众行星的轨道水平面）。“旅行者 2 号”则按照黄道面内的常规路线，沿着“木星—土星—天王星—海王星”的路线航行。

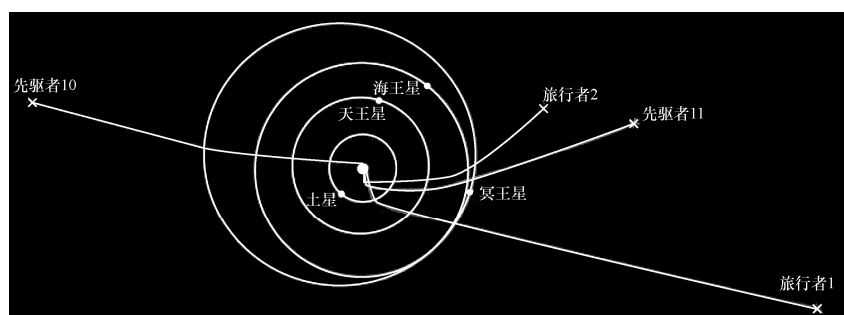


图 1-9 旅行者轨迹图

旅行者号上面载有一个称为“地球之音”的光盘，光盘上的信息量非常丰富，有 116 张地球信息的图片，有照片、录音带、录像带、图表，有用 60 多种语言向外星人表达的问候、35 种自然界的音响（刮风、下雨、流水等）、27 首古典和现代音乐（其中有我国的《高山流水》），还有当时的联合国秘书长瓦尔德海姆亲自口述的录音和美国总统卡特的电文。解读这张光盘的秘密在于宇宙间最基本的元素——氢，在光盘的左角画有中性氢超精细跃迁的图解，设计者认为任何一个具有一定文明程度的生命都能够具有氢的知识。

旅行者号造访了木星、木卫一号和二号、土星、天王星、天卫五号、海王星和海卫一号，拍摄了大量的珍贵照片，更是人类首次造访天王星、海王星及其卫星。1989 年 8 月 25 日凌晨 3:40，“旅行者 2 号”空间飞行器途经海王星上空，逼近它最大的“月亮”海卫一号时，守候在美国帕萨迪纳喷气推进实验室的科学家和记者们第一次看到了这颗“月亮”几乎完美无瑕的清晰图样。一时间，欢呼雀跃！“旅行者 2 号”将离地球 10^6 km 之遥的海王星附近拍回的海王星及其卫星的照片，用 10^{-23} W 功率的无线电波发送回来，这是人类空间探测器距离最远的一次。12.4 个地球年后，即 1990 年 2 月 14 日，“旅行者 1 号”已经越过了冥王星轨道，距离地球约 40 亿千米，下一步将进入太阳系的边缘，此时它调转身姿、回望地球，用 6 个月时间为太阳系拍摄了一张并不完美的全家福（如图 1-10 所示），这也是太阳系唯一一张全家福，但因为距离太过遥远，有些行星的大小还不足一个像素。

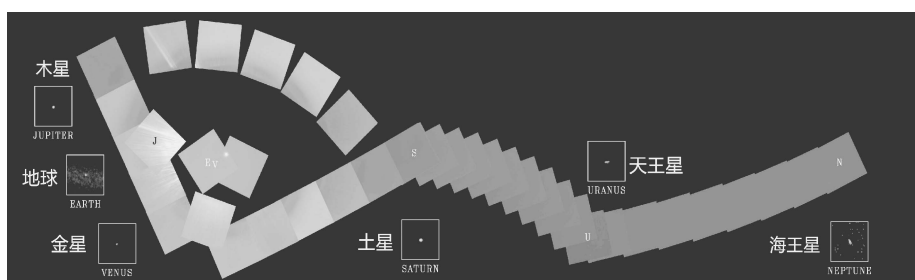


图 1-10 太阳系全家福（“旅行者 1 号”拍摄，灰色区域代表行星分布的实际位置；海王星 N、天王星 U、土星 S、金星 V、地球 E 及木星 J；因为太阳光的影响，水星、火星未能拍摄到）

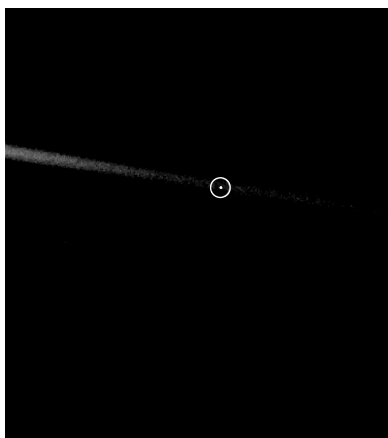


图 1-11 全家福中圆圈中的小点为地球

全家福中的地球则被单独放大，成为航天史上的三大摄影作品之一，名为“暗淡蓝点”（Pale Blue Dot）。是的，我们人类所生存地球，在宇宙面前只有这么一丁点（如图 1-11 所示）。

拍摄完太阳系全家福后，“旅行者 1 号”关闭了大部分设备，为冲出太阳系保存体力。35 个地球年后，即 2012 年 8 月 25 日，“旅行者 1 号”脱离太阳风的范围，当时距离太阳约 19 光时（即以光速传播 19 个小时的路程），标志着人类迈入星际空间的历史性一步。

对于太阳系的边缘究竟在哪里，一直有争论，目前普遍比较认可的是奥尔特星云的边界，距离太阳 10 万~20 万个天文单位（1 个天文单位近似为地球与太阳的平均距离，约 1.467 亿千米），在那之外，银河系引力场的潮汐作用及附近恒星的引力作用将超过太阳的引力。奥尔特星云的外边缘因此被认为是太阳系的边界。

两个旅行者号星际探测器正在向太阳系外人类从未探索过的地区疾驰而

去，它们沿途测量星球间神秘环境中的星际介质。在旅行者 1 号和 2 号穿越太阳系进入星际空间的道路上，美国国家航空航天局（NASA）的哈勃望远镜一直关注着它们。哈勃望远镜的两道视线（图 1-12 中的两个圆锥形）即两颗探测器的路径。哈勃望远镜通过测量探测器未来行进轨迹中的星际介质，为旅行者号提供航行地图，如图 1-12 所示。即使在这 10 年内，旅行者号的电量耗尽，再也无法传送新的数据，天文学家们仍能通过哈勃望远镜的观测来确定这些沉默的地球大使们即将前往的环境。哈勃望远镜的目的在于帮助宇航员绘制星际结构，包括各种航天器的飞掠运行轨迹。这两道“视线”中的星球都距离地球好几光年。

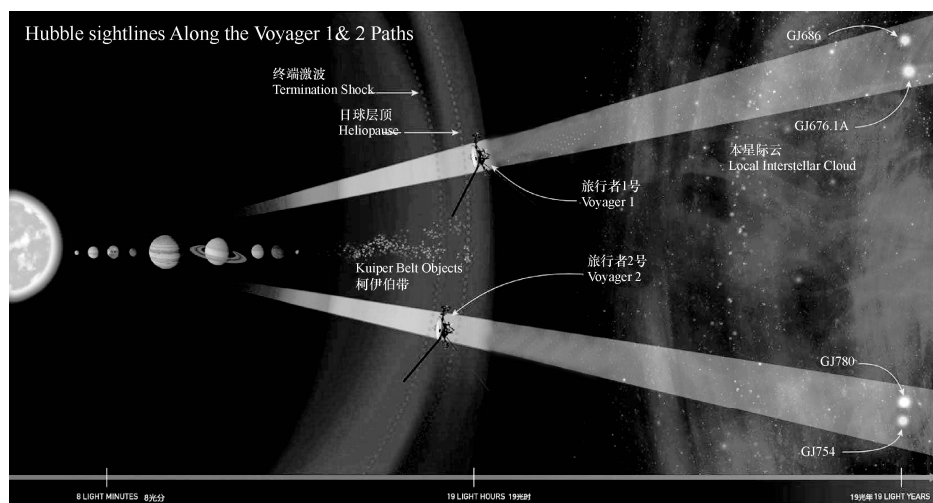


图 1-12 哈勃望远镜为旅行者号的星际之旅探路

领头的“旅行者 1 号”探测器现已距离地球 209 亿千米之遥，这使它成为了史上距离地球最远、速度最快的人造物。它如今正在探索太阳系最边界的区域，正掠向充满着气体、尘埃，以及垂死恒星的喷射物的星际空间。在接下来的约 4 万年里，在探测器不再运行，不再收集新数据之后，“旅行者 1 号”将穿越 1.6 光年的距离，到达位于鹿豹座的格利泽 445 恒星。“旅行者 2 号”（现在距离地球 169 亿千米）将在未来 4 万年中走过 1.7 光年，到达罗丝 248 恒星。

哈勃望远镜发现，“旅行者 2 号”即将摆脱围绕着太阳系运行上千年的星际云团。基于哈勃望远镜的数据，宇航员们预计这个探测器将在第二层云团中行进 9 万年，然后进入第三层星际云团。

48 个地球年后，即公元 2025 年左右，我们将不再能收到旅行者号的任何信息，但这并不会影响它们向宇宙深处递送人类文明的使命。据科学家推算，38295 个地球年后，即公元 40272 年左右，“旅行者 1 号”将会接近小熊星座 AC+793888。4 万个地球年后，即公元 41977 年左右，“旅行者 2 号”将会接近仙女座红矮星 ROSE248。

数万年的旅程，跨度约为 1.7 光年，而目前人类已知宇宙直径高达 910 亿光年，1.7 光年只是人类迈出家门的小小一步。旅行者号飞出太阳系到茫茫宇宙中去了，之后会有什么消息？值得期待！

第二节 生命存在的条件

探索地外生命，首先应了解生命在什么环境下才能存在。从物理环境上来说，有以下两个条件。

一是需要液态水，水和生命是密切相关的。水是生命之源，地球上的生命就是起源于海洋之中。液态水作为溶剂，组织液遍布生命体的全身，没有液态水，生命体内的分子活动将停顿，生命也就从此消失。水必须是液态的，气态和固态都不行。

二是需要适宜的温度。最好的温度为室温， 27°C （热力学温度 300K ）左右，其原因是，从物质基础上看，组成生物的大分子（如蛋白质等）只有在室温附近种类最多，统计约有 10^9 多种，而增加或降低几十摄氏度都将使大分子的种类大大减少。温度只能在上下几十摄氏度的范围内， 50°C 时可能还有生命， 100°C 时生命就不存在了， -30°C 、 -50°C 时即使生命能保存下来也不能活动，比如种子在 -40°C 可能潜伏多年而不发芽，所以生命现象没有几十摄氏度的活动余地，不能太热也不能太冷。科学家研究认为，高温时，生物发生脱水，酶的活动停顿，蛋白质凝固，最后发生炭化而处于完全干燥状态，从而丧失生命。高温中仍能维持生命的特殊生物有温泉中的耐热细菌，它能在 77°C 时发育，一旦高于这个温度，这些耐热细菌同样会脱水炭化而失去生命。相反，当温度降低到冰冻的程度时，生命也不适宜生存。有些海藻、苔藓、细菌能在接近热力学零度时维持数星期的生命。可见生命现象只有几十摄氏度的生存空间，因此 27°C 左右的温度最适合生命存在。地球上的生物绝大多数都是存活在这个条件下的。

地球为何有如此适宜的温度呢？这应归因于地球在太阳系中独特的位置和本身的特性。下面，我们基于热力学对地面温度进行估算^[1]。

利用斯特藩-玻尔兹曼（Stefan-Bolzman）定律，黑体的总辐射度（单位时间单位面积辐射的能量）为

$$W_T = \sigma T^4 \quad (1-1)$$

太阳近似视为黑体，则太阳单位时间辐射的能量为

$$L_S = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4 \quad (1-2)$$

在单位时间内，它辐射到地球轨道单位面积上的能量为

$$E = \frac{L_S}{4\pi r_{SE}^2} = \left(\frac{R_S}{r_{SE}} \right)^2 \sigma T_S^4 \approx 0.14 \text{ W/cm}^2 = 2.0 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}) \quad (1-3)$$

式中，日地距离 $r_{SE} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ， E 为决定地球上一切生命的常数，称为太阳常数。

由于地球大气的存在，我们可以把地球视为一个等效温度为 T_E 的黑体，它吸收的太阳能量和辐射能量相等时，达到收支平衡，此时有

$$4\pi R_E^2 \sigma T_E^4 = \pi R_E^2 E \quad (1-4)$$

$$T_E = \left(\frac{R_S^2}{4\pi r_{SE}^2} \right)^{\frac{1}{4}} \approx 300 \text{ K} \quad (1-5)$$

式中，太阳半径 $R_S = 6.95 \times 10^5 \text{ km}$ ，太阳表面温度 $T_S = 6000 \text{ K}$ ，地球半径 $R_E = 6380 \text{ km}$ ， σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。由此可见，地球的位置恰好是太阳系内生命适宜生存的地方。实际上，每个恒星发光发热时，其系统内都有宜居带，寻找地外生命也应该从恒星系统的宜居带开始。

其实，这两个条件是有联系的，什么样的温度才能有液态水呢？物理课上曾做过这样的实验，瓶中装有水，然后抽气，抽到一定程度后，水就沸腾了。一定温度对应一定的蒸汽压，水在 100°C 时的蒸汽压是 760 mmHg ，即在大气压为 760 mmHg 时，水加热到 100°C 沸腾。假如我们到云南、西藏等海拔 2000 多

米的高原上，大气压没有 760mmHg，只有 500mmHg 或 400mmHg 左右，那里烧开的水只有 90℃或 80℃。大气压越低，水沸腾的温度就越低，没有足够的大气压，即使在室温条件下，也有可能不存在液态水而成为水蒸气。

什么样的情况有大气压呢？为什么地球表面有，月球表面就没有大气呢？这就是万有引力的作用。星球太小了，引力就很小，不可能吸引足够的大气。在 1 标准大气压(1atm = 760mmHg $\approx 1.01 \times 10^5$ Pa)下，水的沸点是 100℃。若大气压减小一个数量级，水将在 40℃沸腾；若减小两个数量级，不到 10℃水就会沸腾。若大气压过高，水的沸点将远超 100℃，这个温度不利于生命体的存在。由此可见，行星表面的大气压应在 1 标准大气压左右。另外，大气层可以减少行星向外辐射的热量，使行星有个比较均匀的温度。月球表面昼夜极大的温差和无水的环境就是因为没有适宜的大气层。

综上所述，并不是每个行星都能拥有自身的大气环境，这是由行星自身的质量和半径所决定的。行星通过引力来维系大气分子，引力势能必须远大于分子热运动动能，否则处在麦克斯韦分布高能尾部的分子仍会大量逃脱。我们常认为引力势能必须比分子热运动动能大两个数量级及以上^[1]，即

$$\frac{GM\bar{m}}{R_x} > 10^2 KT \quad (1-6)$$

或等式两边同乘阿伏伽德罗常量 N_A 得

$$\frac{GM\bar{\mu}}{R_x} > 10^2 RT \quad (1-7)$$

式中， M 为行星的质量， \bar{m} 为大气中分子的平均质量， K 为玻尔兹曼常数， $\bar{\mu}$ 为大气中分子的平均摩尔质量， T 为行星表面温度， R 为气体常数， R_x 为行星半径。我们将地球和月球的参数代入式中检验，得出的结果与事实相符。

除此之外是否还有其他的条件呢？比如大气中是否必须有氧气 (O_2)？

实际上， O_2 不是必需的，早年在地球上没有 O_2 ，海洋中产生了绿色的藻类，能够进行光合反应，是厌氧的，但它在光合作用下能把碳水化合物（ CO_2 和 H_2O 结合）氧化。所以由于大批绿色植物的繁殖，经光合作用吐出氧，使大气中的 O_2 多起来，形成富氧，出现了另一种生命形态依靠 O_2 存活。所以确切地说，不是 O_2 造就了生命，而是生命造就了 O_2 ，原始生命不是依赖氧的， O_2 不是必备条件。

第三节 太阳系内地外生命的探索

太阳系是我们生活的恒星系统，行星（Planet）一词来自希腊文，意义为漫游者，即人类发现的会移动的星星。地球是我们生活的家园，其上生机盎然，其他行星是否存在生命，一直以来都是人类所关注的问题。同时，由于人类科学技术的局限性及宇宙的浩瀚，太阳系内地外生命的探索成为了人类探索地外生命的开端。太阳系的主要成员包括：八大围绕太阳公转的行星、矮行星、小行星带和彗星等。根据国际天文学联合会 2006 年 8 月 24 日通过的决议，被称为行星的天体要符合以下 3 个主要条件：

- 该天体须位于围绕太阳的轨道之上；
- 该天体须有足够大的质量来克服固体应力，以达到流体静力平衡（Hydrostatic Equilibrium）的形状（近于球形）；
- 该天体须已经清空了其轨道附近的区域。

而冥王星则不符合上述第 2 条行星标准，比月球还小，而且轨道太过椭圆。最终，天文学家以投票形式将冥王星划为矮行星，自行星之列中除名，太阳系从九大行星变为八大行星。

表 1-1 中列出了太阳系内行星、小行星带和冥王星的相关数据。

表 1-1 太阳系内行星、小行星带和冥王星的相关数据

| 类别 | 行星 | 轨道 半长轴 （地球 =1） | 轨道面 与黄道 面夹角 | 轨道 偏心率 | 赤道 半径 （km） | 公转 周期 （地球 年） | 自转 周期 （地球 日） | 质量 （地球 =1） | 平均 密度 （g/cm ³ ） | 表面 平均 温度 （℃） | 表面 大气压 （atm） | 卫星数 |
|----------|----|-------------------------|-------------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|-----|
| 类地 行星 | 水星 | 0.39 | 7.0 | 0.0206 | 2440 | 0.241 | 58.65 | 0.056 | 5.43 | 昼-430 夜-170 | — | 0 |
| | 金星 | 0.72 | 3.39 | 0.007 | 6070 | 0.615 | 243.01 | 0.82 | 5.25 | 460 | 90 | 0 |
| | 地球 | 1.00 | 0 | 0.017 | 6378 | 1 | 0.0997 | 1 | 5.50 | 15~20 | 1 | 1 |
| | 火星 | 1.52 | 1.85 | 0.093 | 3389 | 1.88 | 1.026 | 1.108 | 3.93 | 昼-33 夜-85 | 0.088 | 2 |

(续表)

| 类别 | 行星 | 轨道 半长轴 (地球 =1) | 轨道面 与黄道 面夹角 | 轨道 偏心率 | 赤道 半径 (km) | 公转 周期 (地球 年) | 自转 周期 (地球 日) | 质量 (地球 =1) | 平均 密度 (g/cm ³) | 表面 平均 温度 (℃) | 表面 大气压 (atm) | 卫星数 |
|----------|---------|-------------------------|-------------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|-----|
| 小行星带 | | 2.3~3.3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 类木 行星 | 木星 | 5.2 | 1.3 | 0.049 | 71540 | 11.86 | 0.0415 | 318 | 1.33 | 无表面 | 无表面 | 16 |
| | 土星 | 9.5 | 2.49 | 0.054 | 60330 | 29.46 | 0.445 | 95.1 | 0.71 | 无表面 | 无表面 | 23 |
| | 天王 星 | 19.2 | 0.77 | 0.047 | 26145 | 84.01 | 0.718 | 14.5 | 1.24 | 无表面 | 无表面 | 15 |
| | 海王 星 | 30.1 | 1.77 | 0.009 | 24746 | 164.79 | 0.669 | 17.2 | 1.67 | 无表面 | 无表面 | 8 |
| | 冥王 星 | 39.2 | 17.2 | 0.25 | 1100 ~1200 | 250.3 | 6.4 | 0.002 | 0.4~1.0 | 昼-229 夜-270 | 0.0001 ~0.05 | 5 |

从表 1-1 中我们可以看出，4 颗类地星体水星、金星、地球、火星的密度比较接近，火星稍小点，但都是岩石结构的星体。以地球质量为标准，水星质量只有地球的 5.6%，无法吸引大气，表面温差可达 600℃；而金星质量是地球的 82%，和地球非常接近，但表面大气压却是异常的 90atm，且 460℃的常年高温；火星质量是地球的 10%左右，也很难吸引大气，表面大气压只有 0.088atm，且因离太阳较远，温度都在零下。4 颗类木行星特点是质量大、密度小，应该是气体组成的星体。木星作为太阳系内最大的行星，质量是地球的 318 倍，然而密度小、无表面；土星被科学家们戏称：“如果有个巨大的海洋，把土星丢进去，它会像皮球一样漂浮在海面上，原因是，它的密度只有 0.71g/cm³。”同样，天王星与海王星都具有较小的密度，它们的大小对比分别如图 1-13、图 1-14 和图 1-15 所示。

早期人类通过望远系统观测和科学计算，发现并解决了一些问题，同时也留下一些疑惑，如火星上的“运河”等。随着科技的发展，特别是航天器和计算机的使用，人类对太阳系的探索发展到了近距离探索及登陆车实地考察阶段。虽然至今除地球外太阳系内还未发现有生命存在的迹象，但人类从探测太阳系中获得的大量数据和资料，为人类进一步了解宇宙及生命打下坚实的基础。

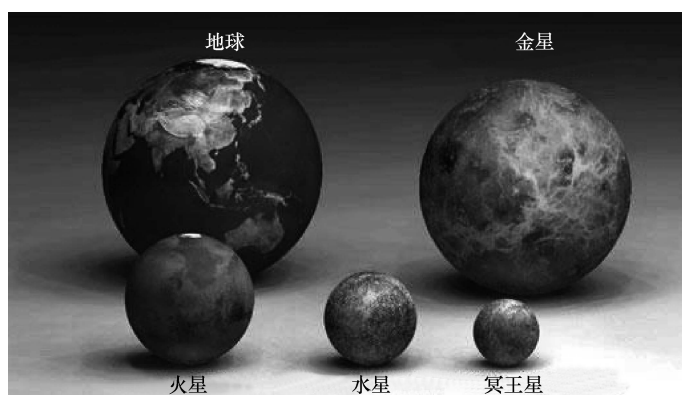


图 1-13 地球有多大（与类地星球和冥王星的对比图）

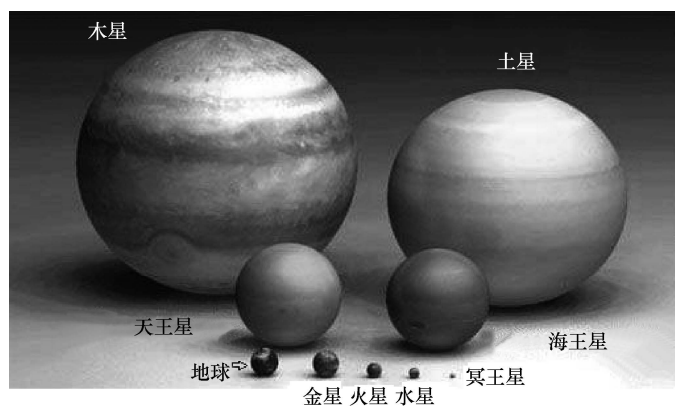


图 1-14 地球有多大（太阳系行星和冥王星的对比图）

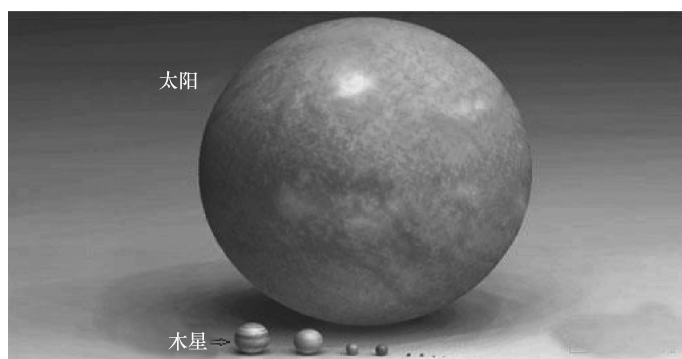


图 1-15 太阳有多大

一、类地行星

距太阳最近的是 4 颗类地行星，除地球外，还有水星、金星和火星。它们的许多特性与地球相似：质量小、密度较大、表层都覆盖有坚硬的岩石外壳，所以它们也称为岩石星体。地球的平均密度为 5.5g/cm^3 （花岗岩密度为 2.7g/cm^3 ），因为地球内部很大一部分是铁，还有镍等重金属，而月球密度只有三点多。类地行星都由一个硅酸盐的花岗岩加一个内壳组成，壳表面为固体，内部可能有金属岩浆。

1. 水星

西方人用希腊神话中信使与智神墨丘利（Mercury）的名字命名水星，古代中国称之为辰星。水星是最靠近太阳的行星，它到太阳的距离为 5800 万千米，仅为日地距离（用 AU 表示）的 0.4。从地球上，它与太阳的角距离不超过 22° ，因而它只能在地平线附近被人观测到。

20 世纪 60 年代查明，水星的自转周期（58.65 地球日）与公转周期（0.241 地球年，即 88 地球日）之比精确地等于 $2/3$ ，这是潮汐作用引起的某种共振现象。

人类早期运用望远系统观测，发现水星表面和月球一样，到处是凹凸起伏、大大小小的环形山，如图 1-16 所示。通过探测器近距离探测证实：水星的日光辐照强度比地球大 7 倍，水星表面无大气，这正是由于水星质量与半径不满足式（1-7）造成的。同时，太阳以 9 倍于地球的光和热近距离地燃烧着水星，使水星向阳的一面温度达到 436°C ，岩石中的铅和锡都被太阳光熔化了。而在背阳一面，由于无大气起到调节温度的作用，温度下降得极为迅速，多在 -163°C 。水星的一昼夜约为 60 个地球日，即在一个月的时间内连续暴晒，接着在一个月的时间内极度深寒。这种温度条件根本不适合生命生存，加上水星表面无大气、无液态水的环境，水星上不可能存在生命。

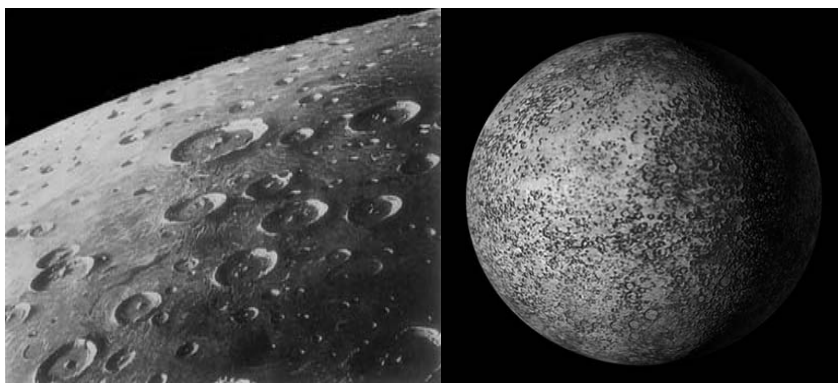


图 1-16 水星表面环形山和外观图

对水星最重要的一次探测是由 1974—1975 年间美国发射的“水手 (Mariner) 10 号”完成的。该探测器于 1973 年 11 月 3 日射向金星，金星的引力使它的轨道偏到奔向水星的方向（如图 1-17 所示），它沿着一条周期恰好等于水星公转周期两倍的轨道绕日运行，在此期间水星恰好自转了三次。“水手 10 号”每次飞临水星上空时，它的摄像镜头看到的总是水星的同一半球，水星另一半球的表面至今不为人类所知。水星的表面很像月球，上面布满环形的陨石坑（如图 1-18 所示），但它的平均密度 ($5.43\text{g}/\text{cm}^3$) 比月球大，接近地球的密度，水星中心可能也有一个金属的内核。近年来的探测表明，在其极地可能存在固态水冰。

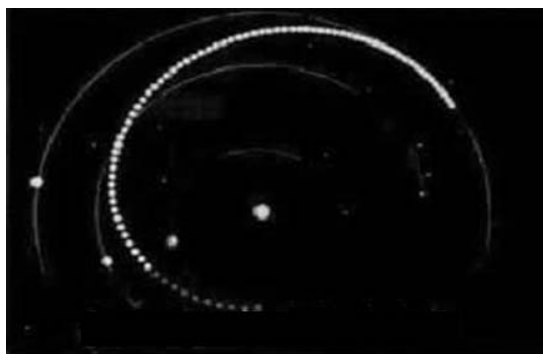


图 1-17 金星引力使“水手 10 号”轨道偏向水星



图 1-18 “水手 10 号”拍摄的水星表面的陨石坑

关于水星有一个故事，曾经从笔尖上算出来了新行星——海王星的法国天文学家勒维烈试图去解释水星实际近日点移位与计算出的移位的差距。按传统力学的方法计算，水星在太阳和其他大行星引力的作用下，其近日点每世纪会进动 5557.62 角秒，但实际观测的数字是 5560.73 角秒，比预期差 43 角秒，于是勒维烈便假设水星轨道以内，尚有一颗大行星未被发现。天文学家把它取名为 **Vulcan**，这是古罗马神话中火神的名字，中国传统文化称之为“祝融星”。但是其后反复的天文观测，怎么也找不到这颗行星的踪迹。1916 年，爱因斯坦广义相对论问世，恰好预言水星近日点另有每百年 43 角秒的额外旋进，了结了这段公案。水星进动也是爱因斯坦广义相对论三大实验验证之一，后文中我们会做更详尽的讲解。

2. 金星

在希腊与罗马神话中，金星是爱与美的化身——女神维纳斯（**Venus**），如图 1-19 所示。金星与水星一样，也是轨道小于地球的“地内行星”，它与太阳的距离为 10800 万千米，自转周期为 243 个地球日。金星是离地球最近的行星，距离只有



图 1-19 金星外观图

0.27AU，它是天空中最亮的星星。我们看到金星与太阳的角距离（也就是半径绕太阳转）为 46° ，故我们只能在早上天还没亮和晚上太阳落山时看到它。所以，无论中国还是外国都认为这是两颗不见面的星，古代中国称之为“启明星”和“长庚星”。然而长期以来，在可见光波段，人们对金星的表面一无所知，这是因为在金星外笼罩着稠密的大气和云层。直到空间时代来临，这颗神秘行星的面纱才逐渐被揭开。

自 1961 年到 1984 年的 20 余年间，苏联发射“金星”（Venera）1~16 号和“金星-哈雷彗星”（Vega）1 号、2 号等近 20 个飞行器。从 1962 年到 1973 年间，美国也发射了“水手”1、2、3、5、6、10 号等多个目标针对或包含金星的探测器，1989 年 4 月 28 日又派出“麦哲伦号”（Magellan）宇宙飞船测绘金星表面地图。经历了金星 1~6 号的失败后，金星 7~14 号成功登上这颗星球。

探测器发回的资料表明：金星的半径比地球小 300km，质量是地球的 $\frac{4}{5}$ ，平均密度略小于地球。因此，人类早期认为金星的内部结构与地球差不多，但是金星大气光谱告诉我们那里缺水。此后，由金星的射电辐射估计，其表面温度可能达到 330°C 。直到 1970 年“金星 7 号”首次在金星的夜半球着陆后，才确切得知其表面温度高达 460°C ，“金星 7 号”也只坚持正常工作了 23 分钟。后来，登陆的设备性能改进了，工作时间最多达到 2 小时左右。“金星快车”（Venus Express）是欧洲航天局（ESA）2005 年发射金星探测器，也是世界第一个对金星大气和等离子环境进行全球研究的探测器。它将对金星进行了为期 2 个金星日（相当于地球上的 500 天）的科学观测，详细地研究金星大气和云层，并且绘制金星全球表面温度图。这对认识地球长期的气候演变进程起到至关重要的作用。“金星快车”探测器的科学任务主要包括：研究等离子环境及它和太阳风的相互作用；研究大气环流和温室效应的特性和机制；研究云层的物理和化学特性；研究低层大气的组成及它和金星表面的相

互作用；研究表面红外地形学。

金星大气的主要成分是 CO_2 （体积占96.4%），此外还有 N_2 （3.4%）、 SO_2 （0.02%）、水气（0.14%）等，表面大气压高达 90atm。在高度 45~60km 之间长年漂着一层黄色的 H_2SO_4 浓云，下面不断下着酸雨，但酸雨不会降落到金星地表，因为高温环境使雨滴在降到 30km 高度之前蒸发了。金星离太阳比地球近，它接收的日光辐照是地球的 1.9 倍，但是它浓密的大气有更高的吸收率，直接到达金星表面的阳光还不到 1%。金星 11 号和 12 号还观测到，云层下面一道道闪电连绵不断地掠过长空，给“大地”投下一片诡谲的色调，景象十分恐怖，活像中世纪描绘的“地狱”，其模拟图如图 1-20 所示。



图 1-20 金星表面情景模拟图

金星是原来就如此呢？还是慢慢演化成这样的呢？金星表面是否从来就这样热？很可能其早期与现在的地球差不多，气温凉爽，大气适宜，还有相当多的液态水。然而通过对金星的大气分析可知，金星上空的水气很少，重水含量高。而地球上氢二氧和氘二氧有一定比例，即重水占有一定的百分比。1978 年，美国“先驱者-金星”（Pioneer-Venus）探测器的探测结果表明，金星水蒸气中重水丰度比地球大 100 倍。人们设想，那是一次失控的温室效应

造成的。很可能在金星的早期历史中，它的表面与现在的地球差不多，温度没那么高，大气没那么稠密，还有相当多的液态水。由于它离太阳近，紫外线强，紫外线对水分子起到了光化离解的作用，使水分解成氧、氢、氦。氢分子质量特别小，逃脱星球吸引力飞走得多，氦比氢重一倍，飞掉的可能性小，剩下的氦和氧重新结合为重水。大量的水蒸发到大气中，使大气对红外辐射变得不透明，温室效应使温度越来越高。在高温下，岩石中的 CO_2 被大量烤出来，进一步加强了温室效应，如此恶性循环，发展的结果就是岩石中的 CO_2 全部被驱赶到空气中，形成了今天金星浓厚的大气层。在 90atm 的金星大气中，水蒸气的分压只有 0.14atm。由此可见，金星表面高温高压、无液态水的环境不可能有生命存在。

形成失控温室效应的原因总结有三个：一是离太阳过近，大量的水蒸发到大气中，加厚了大气；二是岩石中的 CO_2 被大量烤出来，进一步加强了温室效应；三是加剧的温室效应又加倍烤出更多的 CO_2 ，形成今天金星的浓厚大气层。

我们来关心一下地球，有人估计，金星上和地球上储存的 CO_2 ，总量是差不多的，只是金星的 CO_2 几乎全在大气中，而地球的 CO_2 大部分在岩石中。地球上层大气同样有很强的紫外线，为什么没有出现这种情形呢？原因是地球上空的臭氧层把大部分紫外线挡住了。臭氧层对保护地球的水起了重要作用，更重要的是还保护生物体不被紫外线直接照射而死，否则生命只能存活于海洋中，不能爬上陆地。而地球上的臭氧层是否被破坏？南极已经发现臭氧洞，假如说是人为的，那就可能是由工业污染导致的。目前，氟的化合物，农药、制冷设备中的氟利昂，都已开始禁用。另外，地球上 15°C 左右是红外线的一个波段，恰好是 CO_2 吸收的波段， CO_2 和地面间形成温室，热量散发不出去，温度就要上升。岩石中吸附了很多 CO_2 ，如果都放出去，地球表面大气压可达 150atm，温度越高，烤出来的 CO_2 就越多，温度就会继续上升，

失控的温室效应将带给地球更严重的后果。全球变暖已经给了人类警示，如何爱惜保护我们的家园，金星为我们敲响了警钟！

无论是中国还是西方的古文化，金星都是善良的化身。传说李白的出生不同寻常，乃是他的母亲梦见太白金星落入怀中而生，因此取名李白，字太白。长大后的李白也确有几分“仙气”，他漫游天下，学道学剑，好酒任侠，笑傲王侯。他的诗，想象力如“欲上青天揽明月”，气势如“黄河之水天上来”，无人能及。又似乎对宇宙和万物形成的物理学原理有所启发，李白在当朝就享有“谪仙”的美名，后来更被人们尊为“诗中之仙”。金星研究对科学贡献还应提到“金星凌日”，由于水星、金星是位于地球绕日公转轨道以内的“地内行星”，因此，当金星运行到太阳和地球之间时，我们可以看到在太阳表面有一个小黑点慢慢穿过，这种天象称为“金星凌日”，如图 1-21 所示。天文学

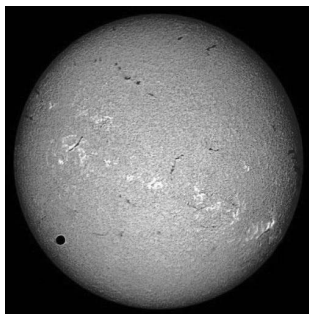


图 1-21 金星凌日图

中，往往把相隔时间最短的两次“金星凌日”现象分为一组。这种现象的出现规律通常是 8 年、121.5 年、8 年、105.5 年，以此循环。17 世纪，著名的英国天文学家哈雷曾经提出，金星凌日时，在地球上两个不同地点同时测定金星穿越太阳表面所需的时间，由此可以算出太阳的视差，可以得出准确的日地距离。

3. 火星

西方人称火星为 Mars，是罗马神话中的战神。火星和金星一样，也是地球的近邻，它的轨道比地球大 1.5 倍，位于地球轨道的外侧。火星与地球极为相似，它也是一个固态行星。大量观测数据证实火星的结构与地球相似，有地壳、地幔及铁质地核。火星的自转周期为 24 小时 37 分，火星赤道与轨道面的倾角为 24° ，故季节变化与地球一样明显，火星上每个季节持续时间比地球长约 1 倍，因此火星的一年大约是地球的两年。在地面上使用倍率不是

特别高的望远镜也可以观测到，火星南北极各有一个白色的极冠，它们随着季节消长。

1877 年，意大利天文学家斯基伯瑞利观测到，火星表面细长的线联通一些暗黑的“湖”“海”，他在报告他的发现时称之为水道（Canali），而新闻报道写成了运河（Canal），以至于人们一直相信火星上存在生命，甚至可能存在“火星星人”。于是，火星成为人类地外生命探索的一个重点。图 1-22 所示为火星的外观图。



图 1-22 火星外观图

在火星探索上，人类的成就是巨大的。1965 年，美国“水手号”到达火星表面观测。1976 年的“海盗号”测得火星夏季平均温度是 -60°C ，冬季平均温度为 -120°C ，火星上一年四季温度较低，且天气变化无常，气压、气温变化极为迅速，往往几秒钟温度就变化 $17\sim 22^{\circ}\text{C}$ 。1997 年，美国“火星探路者号”对火星大气进行的分析表明，火星上白天的气温为 -76.1°C ，夜间的气温为 -133°C 。

“海盗号”的探测还表明，火星上大气稀薄，表面大气压只有 0.008atm 。按体积算，大气的组成是： CO_2 占 95.6% 、 N_2 占 2.7% 、 Ar 占 1.6% 、 O_2 占 0.1% ，而水气的含量极微。火星上水的含量绝不止极冠上这一点，在火星整个外壳内有可能充满冻土。据估计，若这些冻土突然全部融解，火星上海洋的深度将不止数米，而是 $30\sim 300\text{m}$ 。从“水手 9 号”和“海盗号”探测器拍摄的照片上可以看到，火星表面有干涸的河道或被洪水冲刷过的迹象。“火星探路者号”也发现火星上有卵石、沙子，这与地球河道情况近似。科学家们估计，河道可能是 40 亿年前火星大气比较稠密时期的遗迹，洪水是由火山爆发和陨石撞击引起的，一时间冻土大量融解，形成洪水。这些迹象得出一个结论：火星土壤中的水不少，但是是固态水，这是失控的冰川效应。

2003 年，美国实施“火星探测漫游者”计划，先后将“勇气号”（Spirit，

MER-A) 和“机遇号”(Opportunity, MER-B) 两辆火星车送往火星, 并于 2004 年 1 月先后在火星表面成功着陆。“勇气号”拍摄到的火星照片如图 1-23 所示, 火星表面一片荒凉。2004 年 3 月 2 日, 美国“机遇号”火星漫游车登上火星 37 天后, 向地面传回数据, 分析显示: 火星上曾经有过丰富的液态水, 有的地方甚至还被水浸泡过。3 月 5 日, “勇气号”火星漫游车在火星的另一侧也发现了水的踪迹, “勇气号”是在对一块名为“哈姆弗雷”的岩石进行钻孔研究后取得这一发现的。“勇气号”用打钻机在这块岩石上钻了一个 2mm 深的洞, 然后用机械臂上的显微成像仪对其进行了观测。科学家们在分析岩石内的矿物成分后认为, 在岩石形成过程中或者岩石刚刚形成之初, 曾经有水渗入岩石中; 矿物质随水分进入岩石中, 形成结晶, 并留在岩石内部。2006 年初, 科学家在“勇气号”探测器从火星上发回的数据中发现了一种铁矿物质, 这种物质只有在液态水存在的情况下才能形成。美国宇航局科学家史蒂夫·斯克雷斯表示, 这意味着火星上可能存在较浅的、时断时续的水资源。



图 1-23 “勇气号”拍摄的火星表面

但如今，在火星上大气稀薄、温度极低的条件下，不可能存在液态水。故火星上存在生命的可能性极小，但并不排除火星早期存在过生命。

2011 年 11 月 26 日，美国“好奇号”火星探测器成功发射，并于 2012 年 8 月 6 日成功登陆火星。其搭载的“好奇号”火星车（如图 1-24 所示）是一个汽车大小的火星遥控设备，也是第一辆采用核动力驱动的火星车，其使命是探寻火星上的生命元素。2013 年 9 月，美国航天局“好奇号”火星车发现，火星表面土壤按质量算约 2% 是水分，只需将土壤稍稍加热，就可获得水，这是最令人激动的结果之一。



图 1-24 “好奇号”外观

我国也启动了火星探测任务，火星探测成为中国继载人航天工程、探月工程之后的又一个重大空间探索项目。2016 年 8 月 23 日，火星探测工程名称及图形标识全球征集正式启动，同时揭秘了期待已久的中国首辆火星车外观设计，如图 1-25 所示。预计我国首辆火星车将在 2020 年 7 月发射，并于 2021 年抵达火星。

火星大气为什么消失？主要原因是它小了一些。火星的半径为 3389km，差不多是地球的一半；密度为 3.86g/cm^3 ，和月亮差不多，比地球的密度小得多；总质量只有地球的 10.8%，从而表面的引力只有地球的 36.3%。



图 1-25 我国的火星车外观图

阳光中的紫外线对火星的原始大气也起光解作用，把可能存在的 CO_2 、水气和 N_2 分子解离为较轻的原子。这个过程在地球的上层大气中同样发生，并促使游离的氧原子结合成臭氧分子。然而弱小的火星引力却管束不住那些高能的原子，在漫长的岁月中，火星的大气大部分跑掉了。

火星有一对不大的卫星：火卫一（Phobos）长 27km，宽 22km，高 18km；火卫二（Deimos）长 9km，宽 7km，高 6km。二者都不是球形，而是两块形状不规则的大岩石。

二、类木行星

与固态的类地行星不同，太阳系外部的类木行星没有很大的硅酸盐内壳，基本上是由气态和液态物质组成的，它们也称为气态星体。它们体积宏大，密度却较小，而且它们都拥有众多的卫星，这个数目似乎还在不断地增加中，并且在这些卫星中，似乎可能存在生命。

1. 木星

木星是太阳系中最大的行星（如图 1-26 所示），西方人称 Jupiter，是罗马神话中的众神之星。其质量是地球的 318 倍，体积超过地球的 1300 倍，故其密度比类地行星小得多，只有 1.4g/cm^3 。具有这样的密度，其主要成分只能与太阳一样是氢和氦。木星表面是一层相当稠密的湍动气体，其主要成分按质量算氢占 81%、氦占 19%，此外有微量的甲烷、氨、磷化氢、锆化氢、乙烷、乙炔等。木星中心是否有个固态的核心，目前尚不能完全确定，不过可以确定它的绝大部分处于气体和液体（流体）状态。大气中还漂浮着浓云，呈现出红、棕、蓝、白等丰富的色彩和花纹。木星表面花纹的主流是平行其赤道的一系列亮带和暗带，前者是上升的热气流，后者是下降的冷气流。最惹人注目的是中心在南纬 20° 的“大红斑”，它横跨 5 万千米，是类似于地球上飓风的大气旋。木星表面大气的花纹稳定得多，大红斑已被人类观察了 300 多年，据信这是某种形式的耗散结构。木星的外形是扁的，由很快的自转导致，赤道部分的自转周期为 9 小时 50 分。



图 1-26 木星外观图

按“先驱者号”和“旅行者号”发回的数据可建立一个较为实际的木星模型。这个模型认为，除表面很薄的一层是气体外，木星内绝大部分是液态氢和液态氦的混合物。在某个深度以上的氢处于分子液体状态，在此深度以下，压强大于 $3 \times 10^6 \text{ atm}$ ，温度高达 11000°C ，液体处于金属氢状态。据估算，此金属氢层的底部压强为 $3 \times 10^7 \text{ atm}$ ，温度高达 19000°C ，它的下面很可能是一个由较重物质（金属、硅酸盐、甲烷等）组成的小核（占木星总质量的 9%）。

木星表面单位面积上接收到的阳光辐射只有地球的 4%，由热量收支平衡来计算，这里的等效温度应该是 -165°C 。“旅行者号”测量的最新数据是 -149°C 。理论计算表明，木星辐射的能量是它从太阳吸收的能量的 1.67 倍。这就是说，木星内部有一定的能源，这是由于木星内部在强大的引力作用下缓慢收缩，从而释放出一些热量来。从木星上的超低温条件来看，木星上不可能存在生命。

木星的卫星数目较多，其中木卫一、二、三、四是木星卫星中最大的 4 颗，这 4 颗卫星非常大，伽利略早就观测到了它们，故称为伽利略卫星。这些卫星与木星本身成分的差别很大，它们是科学家重点研究的对象。从木卫一的大小、质量、与木星的距离来看，它与月球十分相似，是一个不断喷发着岩浆的火山世界，到处是火山口，被科学家们戏称为“把肚肠都翻到外面去”的星体，温度很高。木卫二、三、四的表面都是冰，4 颗卫星的外面都没有大气。木卫二可能是太阳系中除地球外唯一有液态水的星体，如图 1-27 所示，在它表面的冰层下有个很深的水幔层，覆盖着整个硅酸盐的内核，因为核内放射性元素会辐射能量，水幔层的温度不太低，但其上是否存在生命，还有待进一步探测。

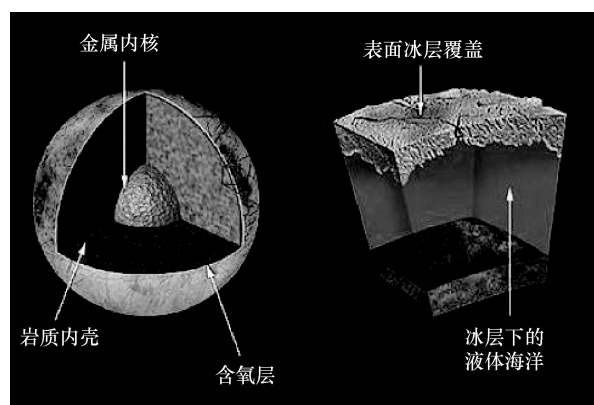


图 1-27 木卫二内部结构示意图

20 世纪 70 年代，美国先后发射“先驱者 10 号”和“先驱者 11 号”探测器，它们是人类最先派到木星附近考察的使者。第二对考察木星的探测器是“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”，于 1977 年发射。这两个探测器沿着两条不同的轨道飞向木星，100 天后，“旅行者 1 号”超过了“旅行者 2 号”，到达木星考察。1989 年 10 月 18 日，美国“亚特兰蒂斯号”航天飞机又把一个“伽利略号”木星探测器载上太空。2011 年 8 月发射的“朱诺号”探测器于 2016 年 7 月 5 日（北京时间）顺利进入木星轨道。“朱诺号”是人类历史上迄今距离木星最近的探测器，它利用木星的磁场、引力场及天然出现的电磁波来研究这颗巨大气态行星的神秘内核，同时也将首次为木星的极地拍照，并对照亮木星南北极的北极光进行深入研究，有望增进人们对木星的起源、演化及行星形成的理解。

现在科学家已经建造了一套太阳系行星形成理论。在太阳系形成初期，太阳系中心的行星由于受辐射太强，气体物质会剧烈沸腾并蒸发，只存留在距离太阳较远的区域。它们有些被外行星吸收，形成巨大的气体行星，有些结成了冰覆盖在最外的小星体表面，并根据理论模拟了不同元素随着太阳距离变化的分布。通过分析木星表面大气成分，便可验证确认该理论是否正确。

作为一颗拥有 60 多颗卫星的气体行星，木星及其卫星又有“小太阳系”之称，因为除气体行星无法通过核反应发光发热外，它们像极了我们身处的太阳系。木星没有核反应的主要原因是自身质量不够大，无法启动这一过程。可以把木星视为一颗尚未成功变成恒星的天体。通过分析木星内部的质量分布、热量分布等，可以对恒星形成过程、开始核反应的关键因素等进行研究。这对恒星形成理论很有价值。

2. 土星

西方人称土星为 Saturn，是 Jupiter 之父，在罗马神话中掌管农业与收获的神，其外观图如图 1-28 所示。土星是太阳系内仅次于木星的第二大行星，它离太阳比木星几乎远 1 倍，也因高速自转（周期为 10.2 小时）而变得有些扁。土星的质量只有木星的 30%，平均密度是木星的一半，为 0.71g/cm^3 ，故它更应该是由最轻的元素氢和氦组成的，其内部也有分子氢和金属氢组成的幔和一个硬的内核。土星赤道与轨道面的夹角为 27° ，其上的季节效应也



图 1-28 土星外观图

非常明显。据估计，土星内核平均密度为 19g/cm^3 ，含 25% 的金属，75% 的冰、甲烷和氨。土星向空间散发的能量是它所接收阳光辐射的 3 倍，故它的内部也有可观的能源，不过它的引力坍缩效应比木星弱得多，其能量来自氨和氢分离而向下沉积时释放出的引力势能。

土星外表最壮观的是它那美丽的光环。早在 1610 年，伽利略就注意到土星有许多“耳朵”；1655 年，惠更斯已正确地把它描绘成与赤道共面的薄盘；17 世纪，意大利天文学家卡西尼设想它是由大量不相连的碎细物体组成的。

麦克斯韦用数学证明，在这个距离上引潮力会把任何较大的固体撕碎。土星环就像一张唱片（如图 1-29 所示），其上有无数同心圆细缝，最大的是卡西尼缝（宽 3500km），其次是恩克缝（宽 320km）。“旅行者 1 号”发现，土星环的厚度小于 10m，土星环内颗粒大小的分布从数米到数微米，其成分是混有杂质的脏雪球。2004 年 7 月 1 日，“卡西尼号”（Cassini）探测器进入土星轨道，开始了对土星的探测。根据“卡西尼号”发回的大量照片和数据得出：土星光环内侧全部都是灰尘和岩石，外侧主要是冰。“卡西尼号”拍摄的土星光环物质如图 1-30 所示。

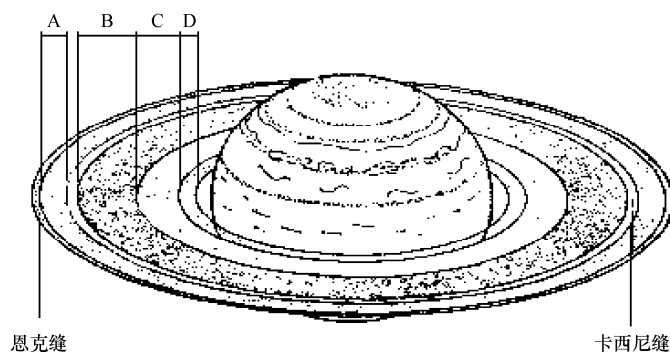


图 1-29 图形光环结构示意图



图 1-30 “卡西尼号”拍摄的土星光环物质

现在已发现的土星卫星有 30 多颗，这个数值似乎还在增加。其中，被命名的卫星中，有 11 颗是直径在 300km 以下的小卫星，6 颗是直径为 400~1500km 的中型卫星，还有 1 颗直径为 5150km 的大卫星——土卫六“泰坦”(Titan)。离土星最近的较大卫星是土卫一，它绕土星转动的周期恰好是卡西尼缝外缘颗粒的 2 倍，它的引力产生的共振摄动作用将那里的质点向外拉，形成了卡西尼缝。

土星卫星中最值得关注的是土卫六，它是太阳系中唯一拥有稠密大气层的卫星，也是土星的最大卫星，命名为“泰坦”。泰坦是太阳系中第二大卫星，直径为 5120km，密度为 1.9g/cm^3 。“旅行者 1 号”曾对泰坦进行过临空探测，2004 年 12 月 25 日，“卡西尼号”释放出“惠更斯号”，后者开始了历时 3 周的泰坦之旅。“卡西尼-惠更斯号”探测器是在 2004 年 7 月 1 日进入环绕土星分轨道的。2005 年 1 月 14 日，“惠更斯号”探测器成功着陆泰坦，实现了对泰坦的实地探测。传回的数据表明：泰坦表面有一层厚厚的大气，比地球厚 10 倍，表面大气压为 1.5atm ，温度为 -180°C ，大气中 99% 是氮气，其余 1% 是甲烷、乙烷、丙烷等碳氢化合物。在泰坦的大气中还检测到多种微量的其他有机化合物，在大气下，泰坦的表面是液态甲烷的海洋，其中混有种类丰富的有机化合物，表面条件与 45 亿年前的原始地球表面极为相似，浓密的大气在高粒子和紫外线的作用下会发生一系列化学反应而生成其他复杂的有机分子，大气中的这些有机分子聚集后就会逐渐落到泰坦表面。这一过程与早期地球形成的情形相似，因此，科学家们希望那里有生命存在。不过，泰坦表面上温度太低，不利于生命生存。至今，在其上的“惠更斯号”探测器也未找到生命存在的证据。图 1-31 所示为土卫六表面的模拟图。



图 1-31 土卫六表面模拟图

3. 天王星

天王星（Uranus）到太阳的距离约为土星的 2 倍，它是太阳系中第三大行星，其最大半径为 25000km，体积为地球的 65 倍，质量为地球的 14.5 倍，密度为 1.19g/cm^3 。天王星是颗蓝绿色的星球，这是因为其大气中由氢和氦构成的甲烷云层吸收红光。天王星上气温也极低，即使在夏季，表面温度也仅为 -211°C 。天王星最特别的地方，是它几乎“横躺”在公转轨道面上，如图 1-32 所示，在它的一年（相当于地球的 84 年）内，阳光轮流照射在它的北极和南极上。“旅行者 2 号”拍摄到的天王星外观图如图 1-33 所示。



图 1-32 天王星横躺在轨道上



图 1-33 天王星外观图

天王星的英文名 Uranus 来自古希腊神话中的天空之神乌拉诺斯，他是萨坦的父亲，宙斯的祖父。与在古代就为人们所知的 5 颗行星（水星、金星、火星、木星、土星）相比，天王星的亮度也是肉眼可见的，但由于其亮度较暗、绕行速度缓慢且当时望远镜的观测能力不足，未被古代的观测者认定为一颗行星。直到 1781 年 3 月 13 日，威廉·赫歇耳爵士宣布他发现了天王星，首次扩展了太阳系的已知界限，天王星也是第一颗使用望远镜发现的行星。

美国“旅行者 2 号”在 1986 年首次飞临天王星，测得天王星上有磁场存在，强度为地球上的 1%。2014 年 8 月 6 日，美国航天航空局（NASA）和欧洲航空局在夏威夷凯克天文台（W. M. Keck Observatory），利用哈勃望远镜成功观测并记录了一场最大规模的风暴。因为天王星具备气态行星的特质，所以经常爆发风暴，生命难以立足。

天王星有 15 颗卫星，在大卫星上，有众多的陨星撞击坑——环形山。它们上面都没有存在生命的可能。

4. 海王星

西方人称海王星为 Neptune，后者是罗马神话中的海洋之神。海王星外观图如图 1-34 所示。海王星到太阳的距离是土星到太阳距离的 3 倍多，它的大小

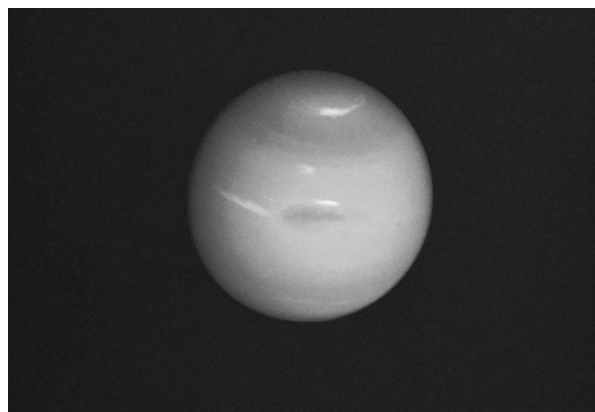


图 1-34 海王星外观图

与天王星差不多，密度比天王星稍大。从望远镜中看去，海王星的色调偏绿，这是因为其大气中除主要成分氢、氦以外，尚含较多的甲烷。经探测器测得，海王星上温度为 -230°C 。海王星有着太阳系内最强烈的风暴，测量到的风速高达 2100km/h 。海王星云顶的温度为 -218°C ，因为距离太阳最远，位于太阳系最冷的地区。海王星核心的温度约为 7000°C ，可以和太阳表面比较，也和大多数已知的行星相似。

海王星被称为从笔尖上算出来的行星。1841 年，法国天文学家勒维烈开始对天王星观测数据的矛盾进行研究。早在 1821 年，法国天文学家波瓦德对天王星的轨道运动做过反复的计算，天王星竟有两个不同的椭圆轨道。他认为，一是 1781 年以前的观测资料靠不住，二是存在当时还不知道的外力对天王星的运动产生影响。波瓦德认准了 1781 年以前的资料靠不住，但是后来的观测表明，天王星仍在不断地越轨，因此波瓦德的解释明显不妥。勒维烈对波瓦德的结果重新进行了推算和研究，经过非常复杂的计算，解出了由几十个方程组成的方程组，最后他认为，天王星不规则的越轨现象是由一颗未知行星的摄动造成的。同样的数学计算，英国天文学家约翰亚当斯也做过，然而他没有勒维烈幸运，没有天文台根据他的计算看到了这颗行星，或者说他求助的天文台没有尽力去观测这颗行星。

1846 年 9 月 18 日，勒维烈写信给德国柏林天文台的天文学家加勒，说他从理论上算得这颗未知行星可能位于摩羯座星座 d 星东方约 5° 的地方，并以每天 69 角秒的速率后退。加勒没有迟疑，立刻申请用天文台最好的望远镜对勒维烈预言的天区进行监测。他们一边观测，一边与人们以前绘制的星图进行对比，找到一个排除一个，结果第二天凌晨，他和同伴达雷斯特发现了一颗星图上没有的 8 等星。当他们喊出：“那颗星星不在星图上”时，一颗人类从未认知的新行星终于找到了！夜间，他们又找到了这颗星，只是位置后退了约 70 角秒。加勒给勒维烈回信，高兴地写道：“你给我们指出位置的新行星

是真实存在的。”人们把这颗从笔尖上算出来的新行星称为海王星。海王星是唯一利用数学预测而非有计划的观测发现的行星，也被认为是牛顿力学的巨大成就与完美验证。

“旅行者 2 号”发现海王星有 6 颗卫星（之后陆续有发现，现在认为是 14 颗天然卫星），其中最引人关注的是海卫一。海卫一的表面温度为 -240°C ，有冻结氮结构的极冠。海卫一密度较大，包含相当多的金属和硅酸盐，具有极稀薄的 N_2 大气，南北极覆盖着固态氮和甲烷的极冠，那里的温度只有 37K 。海卫一的表面呈现出许多火山活动的遗迹，加之它的成分与附近星体有很大不同，人们怀疑它是位“异乡来客”。海卫一的奇特轨道似乎也说明了这一点：其轨道面相对主星赤道面的倾角达 28° ，与土星绕日的轨道共面；此外，它绕主星逆行旋转。1989 年 8 月 25 日凌晨 3:40，“旅行者 2 号”空间飞行器



图 1-35 海卫一外观图

途经海王星上空，逼近它最大的“月亮”海卫一时，守候在美国帕萨迪纳喷气推进实验室的科学家和记者们第一次看到了这颗“月亮”几乎完美无瑕的清晰图样，如图 1-35 所示。一时间，欢呼雀跃！尽管在人类航空航天史上，这不是第一次，但确是当时最远的一次。海卫一运行于逆行轨道，说明它是被海王星俘获的，大概曾经是一个柯伊伯带天体。它与海王星的距

离足够近，以至于它被锁定在同步轨道上，它将缓慢地经螺旋轨道接近海王星，当它到达洛希极限时最终将被海王星的引力撕开。

这里，首先解释一下柯伊伯带。20 世纪 50 年代，柯伊伯和埃吉沃斯预言：在海王星轨道以外的太阳系边缘地带，充满了微小冰封的物体，它们是原始太阳星云的残留物，也是短周期彗星的来源地。柯伊伯带一直被误认为是太

阳系的边界，但太阳系还包括向外延伸两光年之远的奥尔特星云。由于距离太阳较远，柯伊伯带阴暗寒冷，那里天体的命名也是阴森森的味道，比如冥王星（Pluto）、卡戎（Charon）等，卡戎是罗马神话中冥王普路托的役卒，向亡魂索取金钱为他们划船渡过冥河。

再来解释一下洛希极限。当行星与卫星的距离近到一定程度时，潮汐作用就会使天体本身解体分散。这个使卫星解体的距离的极限值由法国天文学家洛希首先求得，因此称为“洛希极限”。当天体和第二个天体的距离为洛希极限时，天体自身的重力和第二个天体造成的潮汐力相等。如果它们的距离小于洛希极限，天体就会倾向碎散，继而成为第二个天体的环。

综上所述，类木星体中的 4 颗行星，因为是气体巨星，生命无法立足。然而，土卫六“泰坦”大气中聚集较多的有机分子，木卫二“欧罗巴”上可能有液态水，它们是有希望存在生命的卫星。

三、冥王星

1930 年，美国天文学家汤博在美国罗威尔天文台的望远镜中，观测到一颗新行星，它的亮度只有 15 等（视星等越高，亮度越低），并命名为太阳系家族的第九大行星——冥王星。然而，谁也没有料到，冥王星的行星地位并没有永恒，70 多年后它被划为矮行星。

冥王星很奇特，它不断地吸收周围的微行星而成长，但速度比木星、土星慢得多，所以还没来得及捕捉星云壮大自己，星云气体就散失了。因此，冥王星到现在还是一个由岩石和冰构成的行星。冥王星的偏心率为 0.256，它离太阳最远时有 49AU。冥王星的直径为 $2000 \pm 140\text{km}$ （比月球还小），质量为地球的 0.002 倍，密度为 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，轨道偏心率比八大行星都大，近日点在海王星轨道内，离太阳 43 亿千米，远日点则可达 72 亿千米。冥王星上的温

度很低，约为 -240°C ，不可能有生命存在。

冥王星很小，却有一颗直径超过 1000km 的卫星卡戎。卡戎的直径为 $1160\pm 100\text{km}$ ，正是因为卡戎的存在，我们才能较准确地估计出其主星的质量。

2006 年 1 月 18 日，美国“新地平线号”冥王星探测器（后又称“新视野号”）从卡纳维拉尔角发射升空，其任务是探测冥王星及其所在的柯伊伯带，如图 1-36 所示。“新视野号”携带核能源，是目前世界上飞行速度最快的空间探测器，但冥王星距离我们太遥远了，为了节约能源，“新视野号”飞行过程中处于休眠状态，每周向地球发回一次报告，每年被唤醒一次做全面检修。“新视野号”上携带一面美国国旗和一张 50 万人签名的 CD，检测任务完成后将飞往宇宙，作为人类的使者，期待与外星文明取得联系。历时九年半，2015 年 7 月 14 日，它抵达冥王星，成为人类首个造访冥王星的探测器。由于冥王星距地球非常遥远，即使“新视野号”探测器发出的信号以光速传播，抵达地球仍然需要 4 小时 20 分钟。



图 1-36 新视野号

“新视野号”不仅代表了第一个行星勘探时代的结束，这次任务还激起了科学家们更大范围的兴趣和灵感。“谁能想到冥王星表面会有一颗爱心呢？”NASA 的行星科学总指挥吉姆·格伦说。冥王星及其卫星的复杂程度远超预期，当前冥王星的地表活跃度和部分表层的年轻程度简直令人震惊。冥王星大气的灰霾与低于预期的大气逃逸比率，颠覆了所有的预飞掠模型。“新视野号”到达冥王星一年后发现，冥王星上存在 1000km 宽的心形固氮冰川（非正式地称为“史泼尼克平原”），如图 1-37 所示，这是目前太阳系中已知的最大冰川。冥王星的大气是蓝色的，其大气压变化巨大，甚至在其表面可能曾存在过流动或静止的液体挥发物，这种现象在太阳系内，只在地球、火星和土卫六泰坦上发生过。

2015 年 7 月 14 日，“新视野号”探测器以最近距离飞掠冥王星前不久，它捕捉到了冥卫一卡戎的高分辨率增强彩色图像。卡戎显眼的微红的北极地区已被非正式命名为“魔多暗斑”，如图 1-38 所示。卡戎内部曾经存在水冰洋，但如今已经冻结。卡戎的暗红色极冠在太阳系中是前所未有的现象，而它极有可能是大气中的气体从冥王星逃逸后吸积在卡戎表面的结果。

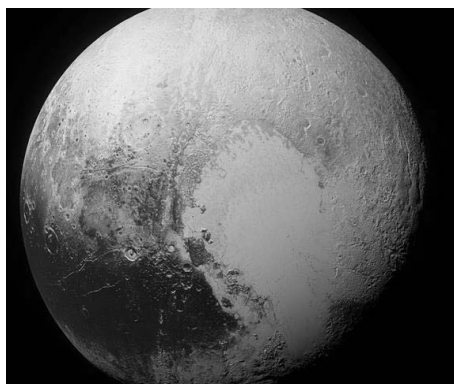


图 1-37 冥王星外观图



图 1-38 卡戎外观图

四、小行星带

1766 年，德国天文学家提丢斯偶然发现一个数列 $(n+4)/10$ ，将 $n=0, 3, 6, 12, \dots$ 代入，可相当准确地给出当时已知行星的轨道半径，如表 1-2 所示。当时天王星和冥王星尚未被发现，其他几颗行星中，除火星和土星有 5%~7% 的偏差外，都非常准确，人们对这个数列充满信心。数列中， $n=24$ 对应的轨道半径 2.8 不应该是空缺的，于是天文学家纷纷将目光投向那里，期待一颗新行星的发现。

表 1-2 提丢斯-波得数列

| 数 列 | 行 星 | 实际位置 (AU) |
|----------------------|------|-----------|
| $(0+4)/10 = 0.40$ | 水星 | 0.39 |
| $(3+4)/10 = 0.70$ | 金星 | 0.72 |
| $(6+4)/10 = 1.00$ | 地球 | 1.00 |
| $(12+4)/10 = 1.60$ | 火星 | 1.52 |
| $(24+4)/10 = 2.80$ | 小行星带 | — |
| $(48+4)/10 = 5.20$ | 木星 | 5.2 |
| $(96+4)/10 = 10.00$ | 土星 | 9.5 |
| $(192+4)/10 = 19.60$ | 天王星 | 19.2 |
| $(384+4)/10 = 38.80$ | 海王星 | 30.1 |
| $(768+4)/10 = 77.20$ | 冥王星 | 39.4 |

1801 年，天才数学家高斯用数学方法计算出了这个位置上新行星的轨道，之后谷神星被观测到，轨道半径为 2.77AU，与提丢斯定则吻合得很好，误差只有 1%，人们也一度认为又一颗新行星被找到。然而谷神星的直径实际只有 1000km，远小于月亮，星光黯淡，远不能与金、木、水、火、土五大行星相比，人们称其为小行星，如图 1-39 所示。之后智神星、婚神星等同样特征的小行星陆续被发现，它们同处一个轨道中，个头偏小，统称为“小行星”。后来的观测表明，在火星和木星之间存在成千上万的小行星，它们环绕太阳组

成了一个美丽的小行星带 (Asteroidal)，如图 1-40 所示。可以想象，直径远小于月球的小行星，是难以吸引大气和让生命立足的。



图 1-39 地球（右）、月球（左上）、谷神星（左下）大小对比

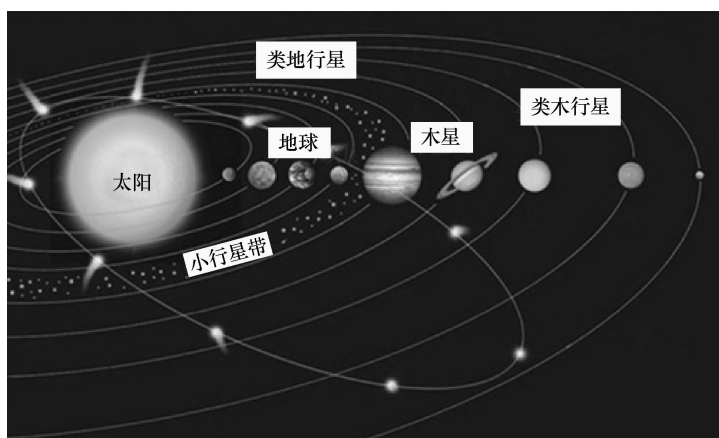


图 1-40 小行星带的位置

在太阳系内探索生命的介绍到这里就结束了。然而，太阳系的边界还没有结束。

研究表明，冥王星所在的柯伊伯带是太阳系内短周期彗星的补充基地。1950 年，荷兰天文学家奥尔特发现了一个长周期彗星的大本营，命名为“奥尔特星云”。奥尔特星云中距离太阳 20000AU 以内呈圆环状分布的称为内奥尔特云，距离太阳 20000AU 以外呈球对称分布的称为外奥尔特云，其范围延伸到了距太阳 50000AU 之外，那里是太阳引力的边缘，在那之外，银河系引力场的潮汐力作用及附近恒星的引力作用将超过太阳的引力，因此奥尔特云的边界应该是太阳系的边界。奥尔特云及太阳系结构示意图如图 1-41 所示。

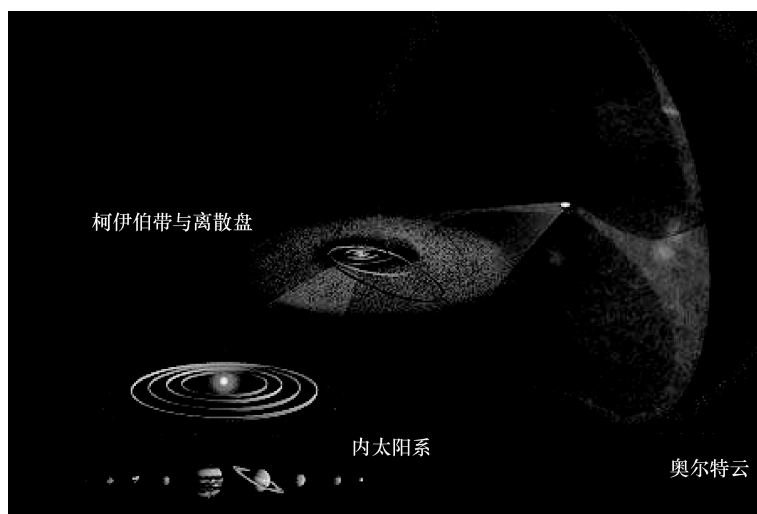


图 1-41 奥尔特云及太阳系结构示意图

第四节 太阳系外地外生命的探索

太阳系内地外生命的探索，使人类对太阳系有了更深入的了解。然而，太阳系内至今还未发现有生命存在的迹象。几十年前，人类就开始通过其他途径寻找地外生命，即对类太阳系系统及类地行星的探测。

一、对类太阳系系统的探测

正是太阳系稳定的结构特性，造就了地球独特的生存环境。宇宙广袤无垠，我们深信在众多恒星系统中，必然有与太阳系类似的系统，在这种系统中，出现生命的可能性极大。当今，类太阳系系统探测的主要方法为视向速度法，也称多普勒法，其内容是：主星周围如果存在巨型气体，则行星将对主星的视向速度产生影响，由主星光谱测得其周期性变化可以推断行星存在的可能性，并计算行星下限。

从美国科学家马约尔和奎洛兹首次使用视向速度法探测到地外行星开始，至今主要有 8 个研究小组用该方法对类太阳系系统进行了探测。他们观测了约 1800 颗类太阳恒星，如果把观测时间延长（约 15 年），则约有 11% 的目标天体可能存在行星系统，如果恒星最小的表面活动都能被最精确的视向速度测量到，则 25% 的目标天体可能存在行星系统。

但是，用视向速度法寻找类太阳系系统需要几年甚至几十年的长时间观测，且一般每次只能观测一颗恒星。因此现阶段地面上为数不多的望远镜难以满足大批行星系统寻找的需要。另外，由于受到视向速度法测量精度的影响，以及小质量行星对主星视向速度影响特别小等特点的约束，视向速度法不能探测到地球质量级的行星，这只能寄希望于空间设备。

二、对类地行星的探测

传统观点认为，生命可以在恒星周围可居住带范围内的类地行星上生存。据科学家分析和计算，以一个星系平均有 300 亿颗恒星为基数，像太阳这样具有行星系统的恒星约占 25%，即 75 亿颗。如果这些恒星拥有的行星中只有 1.7% 可能发展某些“生物圈”，那么，银河系内就可能有 13 亿颗与地球类似的行星。再考虑生命进化、文明进化中的其他因素，估计银河系内约有 3.25 万颗与地球生命形态相似的星球。

当今科学家提出的寻找类地行星的探测方法有以下几种^[2]。

- 视向速度法：用一架光谱望远镜在 10 年内专门监测天空中 1000 颗亮星的视向速度，确认视向速度变化的天体，对这些天体轨道的参数和行星质量予以确认。
- 窄角天体测量法：使用分辨率高的望远镜对一些白矮星和大行星进行观测，同时对一些短同期的行星进行观测。
- 微透镜观测法：一颗沿着微透镜运动的行星将对光源的光曲线产生畸变，如果该行星位于其母星的透镜范围内，将产生显著的摄动，使它的背景光产生暂时的偏差。这种观测技术将能提供恒星与行星之间的质量比及它们之间的轨道间隔。

探测有生命存在的类地行星是一项非常有挑战性的工作，也是天文学中一个重要的发展方向。这样的探测需要分以下步骤进行：（1）探测巨型地外行星；（2）探测类地行星；（3）寻找生物存在的信号；（4）确定这种信号由生物活动发出。由于类地行星的质量很小，因此很难在类日恒星周围找到，近几年即将发射的几颗卫星将很可能发现大批的地外行星，特别是类地行星。

2010 年，欧洲天文学家在距离地球 127 光年外发现了一个罕见的行星系统。这个系统内可能共有 7 颗行星绕 1 颗类似太阳的恒星运行。据信，这是迄今为止在太阳系外发现的最大的行星系统。

自人类在 20 世纪 90 年代初探测到第一颗地外行星以来，截至 2017 年 2 月 15 日，天文学家们已经在 2687 颗恒星周围发现了 5000 多颗地外行星。尽管和地球尺寸大小差不多的行星仅占 20% 左右，但是根据与地球的相似指数判断，2015 年发现的开普勒 452B 和 2016 年发现的比邻星 b 是与地球环境类似的类地行星，其大小对比如图 1-42 所示，所以目前探测到的类地行星是极少的。

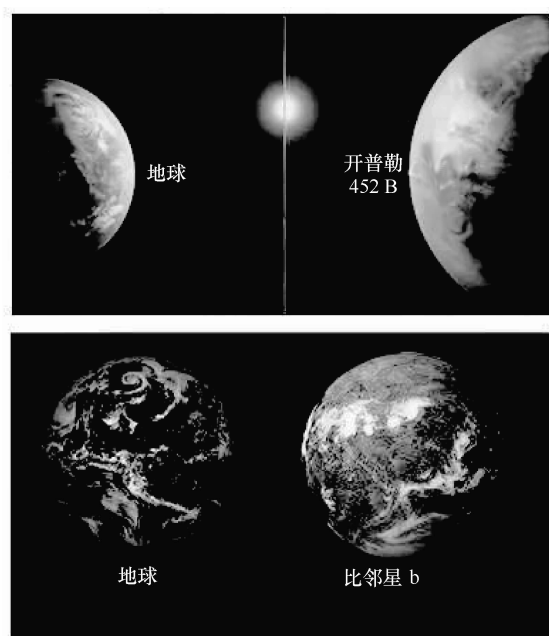


图 1-42 地球与开普勒 452B（上）、比邻星 b（下）的大小对比图

2017 年 2 月，NASA 又宣布了一个令人吃惊又兴奋的新发现：科学家们通过斯皮策红外太空望远镜（SST），在距离地球约 40 光年的地方，首次发现

了 7 个地球大小的行星围绕 1 颗恒星运行的行星系统，更重要的是，其中有 3 颗行星位于母恒星 TRAPPIST-1 的宜居带内，如图 1-43 所示。这一发现刷新了太阳系外围绕一颗恒星运行的宜居行星数量，在此前发现的 30 多个宜居系统中，每个系统都只有 1 颗宜居行星。而这一次，在一个系统中找到了 3 颗宜居行星。多个类地行星系统的发现，或许会为地外生命的探寻开辟一个新的方向。



图 1-43 TRAPPIST-1 系统图

第五节 地外生命探索的畅想

一、费米悖论与绿岸公式

“地外生命在哪里？”著名物理学家费米（如图 1-44 所示）在 1939 年便提出质疑。1943 年，在美国洛斯阿拉莫斯的一次科学聚会上，费米又突发奇问：“它们在哪？”他的伙伴吃惊地问他：“谁在哪？”，“噢，外星人。”费米说道。

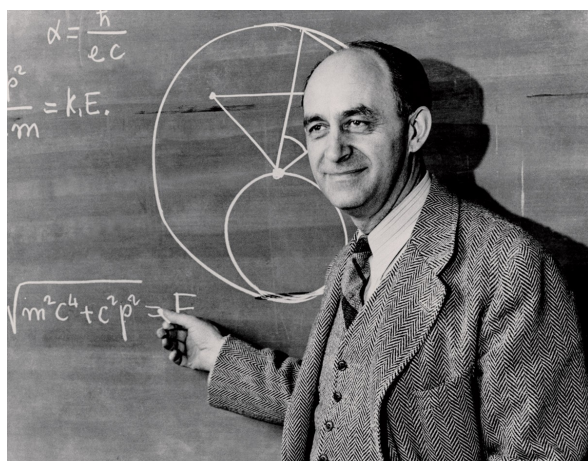


图 1-44 物理学家费米

费米的问题是基于一系列清楚而完整的逻辑推理和观测的结果，导致费米发问的逻辑是这样的：首先假设宇宙中有许多有生命存在的行星，银河系是由恒星、气体和尘埃组成的直径约为 10 万光年的盘状星系。银河系的年龄为 $10 \times 10^9 \sim 15 \times 10^9$ 年，包含 10^{11} 颗恒星，其中与太阳极其相似的恒星至少有数十亿颗，这些恒星中至少有数千万颗周围有行星绕其运行，这些行星中至少又有数百颗具有生命生存的条件。这样，银河系中至少存在

数百个文明社会。但自人类斥巨资搜寻地外文明以来，至今尚未发现任何地外文明。

1961年，美国天体物理学家弗兰克·德雷克提出了著名的“绿岸公式”，这是对探索地外智慧生命做定量分析的第一次尝试，绿岸公式的表达式为

$$N = R n_e f_p f_i f_c L \quad (1-8)$$

式中： N 表示银河系中可检测到的技术文明星球数； R 表示银河系中类似太阳的恒星成形率，一般认为，只有像太阳这样的恒星才有可能孕育智慧生命； n_e 表示在可能携带（具有生命的）行星的恒星中，其生态环境适合生命存在的行星的平均颗数； f_p 表示可能有生物存在的恒星颗数，一般是指那些光度恒稳、能长时间照射，从而满足形成智慧生命演化所需条件的恒星； f_i 表示已经出现生命的行星在可能存在生命的行星中所占的比例； f_c 表示已经有智慧生命的行星的颗数，因为低级生命演化为智慧生命的概率毕竟很小； f_e 表示在这些已有智慧生命的行星中，已达到先进文明的行星（如能进行星际电磁波联络）所占的比例； L 表示具有高级技术文明世界的平均寿命（或延续时间），因为只有持续发展很长时间的文明星球才有可能进行星际互访。

绿岸公式是以乘积的形式给出的，这些因子的确切大小目前尚属未知。公式中各因子的重要性相同，其中有的因子可取近似值（如 R ），有的因子则纯属主观值（如 L ），除了 L ，其余因子的乘积给出的是银河系中可检测文明的产率，用粗略估计的最小值代入计算，可得 $N=40$ 万，用每项的最大可能值计算，则得 $N=5000$ 万。也就是说，银河系中的高级技术文明星球的数量为40万~5000万个。

二、生命存在模式

什么是生命？给生命下定义很难，用几条规则来区分生命和非生命也不易。一块石头是非生命，是组成石头的所有原子的总和。生命是不是组成生

命的所有原子的总和？不能这样说，因为生命从出生到死亡的过程中与外界不断地交换物质和能量，体内的原子在一生中不知道要换多少次。这是用 C_{14} 同位素探测地质年代方法的依据，因为 C_{14} 与 C_{12} 之间有一定的比例关系，在大气中这种比例关系不变。由于地球与大气中宇宙线的相互影响，它保持一个固定的丰度，即放射性元素占整个碳的比例。于是树、动物等不断地呼吸、吃东西，呼出许多 CO_2 ，又生成许多碳水化合物，体内碳原子与周围环境达到一种平衡，直到死亡后，其体内的 C_{14} 是固定的。地质年代通过 C_{14} 衰变了多少可以判定地层的年龄，也证明了生命与非生命的差别。生命只是一个构型，不是固定的原子集合。

生命可以繁殖、可以生长、可以有自我表现的信息存储，复制要按固定的模式，即有遗传密码。生命能演化，是群体能力，然而这个区别也不是绝对的。难判断的是介于生命和非生命之间的病毒，许多条符合生命条件，许多条不符合，现在的结论是病毒是最起码的生命，是最接近于非生命的生命，处于边界上，倾向于生命（计算机病毒也有许多条符合，可复制、演化，但总体处于人造环境，不是生命）。给读者一个畅想，我们在地球上对生命的理解有没有狭隘的地方主义思想？我们不能以地球生命为模板去套用其他宇宙的生命，应该有更开阔的眼光。

三、探索地外生命的畅想

人类一直在努力，地外生命尤其是文明却像和人类玩捉迷藏似的无影无踪，为什么？众多猜测蜂拥而至。

一种猜想认为外星存在远高于我们人类的智慧生命，地球仅仅是外星智慧生命的实验室而已。看一下我们邻近星球的命运吧，火星、金星满目疮痍，到处是陨石坑。来自星球以外的伤害无处不在，而地球为什么逃脱了这样的命运呢？地球的卫星月球上也十分荒凉，到处是环形山和陨石坑，它是不是

为了保护地球而被智慧生命移到地球旁边的呢？它替地球挡住了陨石的撞击，调节了自转与公转周期，让地球得以安定平稳地生存。那么，“他们”要实验什么？也许是实验如果没有外来影响，地球人依靠自己的发展，社会会走向哪里？是和平而繁荣还是战争与自相屠杀？地球是越来越生机勃勃还是恶化直至毁灭？也许外星人没有想到，地球人的科技发展迅速，“他们”既要开展实验又要藏身是不可能的。更何况地球上战争不断，环境日趋恶劣，也许“他们”认为实验失败了，所做的只有放弃，任由其自生自灭！

著名物理学家斯蒂芬·霍金（如图 1-45 所示）在美国探索频道 2010 年 4 月 25 日播出的纪录片《跟随斯蒂芬·霍金进入宇宙》中说，“外星人存在的可能性很大，但人类不应主动寻找他们，应尽一切努力避免与他们接触。”霍金认为，鉴于外星人可能将地球资源洗劫一空然后扬长而去，人类主动寻求与他们接触“有些太冒险”。“如果外星人拜访我们，我认为结果可能与克里斯托弗·哥伦布当年踏足美洲大陆类似，那对当地印第安人来说不是什么好事。”



图 1-45 物理学家斯蒂芬·霍金

中国著名科普作家、雨果奖获得者刘慈欣在小说《三体》中提出了“黑森林法则”。宇宙就是一座黑暗森林，每个文明都是带枪的猎人，像幽灵般潜行于林间，轻轻拨开挡路的树枝，竭力不让脚步发出一点儿声音，连呼吸都必须小心翼翼，他必须小心，因为林中到处都有与他一样潜行的猎人，如果他发现了别的生命，能做的只有一件事——开枪消灭之。在这片森林中，他人就是地狱，就是永恒的威胁，任何暴露自己存在的生命都将很快被消灭，这就是宇宙文明的图景，这就是对费米悖论的解释。一旦被发现，能生存下来的只有一方，或者都不能生存。而地球主动将自己的信息发送出去，无疑将自己暴露于光明之下，成为众多猎人的猎物，结果令人生畏。

然而，也有不少专家对“外星人威胁论”表示质疑。他们从外星人的智慧与科技，甚至人类自身对外星人的心理作用来说明外星人对地球人并不构成威胁。中国语言学家、数学家周海中表示，“如果外星人能来到地球，说明它们的文明程度远远超过人类；文明程度越高，暴力倾向就越低。”他认为，担心外星人的威胁是完全没有必要的，因为只要是高智慧生命体，它们的理智就决定着它们怎样对待其他智慧生命体，外星人与地球人将来是能够和平共处、友好合作和共同发展的。无独有偶，美国天体生物学家大卫·莫里森也表示，“如果一个文明能够存在数十万年，那么它的先进程度一定超过人类。这个文明一定能解决我们面临的一系列问题，所以没有必要侵略地球。”他甚至认为外星人是“和平使者”且友善可爱，并风趣地说，“如果外星人来访，我会好好款待他们。”在诺贝尔物理学奖得主、美国天体物理学家乔治·斯穆特眼里，“外星人威胁论”的种种担忧纯属杞人忧天。

在接下来的十多年甚至几十年中，地外行星及生命的探索必将是太空探索中最繁荣的一个领域。2018 年即将发射的韦伯红外太空望远镜，以及正在建设中的下一代光学红外望远镜（口径将达 30m 左右），凭借着巨大的口径和强大的观测能力，或许未来会向人类揭示这些行星上有没有生命的答案。与此

同时，2018 年，地外行星凌星巡天卫星（Transiting Exoplanet Survey Satellite, TESS）将会发射，众多的地面、地外行星搜寻计划将为韦伯望远镜的深入观测提供更多的目标。由俄罗斯富豪和众多科学家联合推动的地外生命搜寻计划（Breakthrough Listen），也一直在利用地面上的各种大型天文设备（如美国的绿岸射电望远镜）搜寻着宇宙中的智能人造信号。地外生命的探测之路必将曲折，让我们在为努力探索的科学家们加油的同时，一同期盼宇宙深处生命信号的到来。

第二部分
PART 2 / 黑 洞



精讲视频

杠 杆轻撬，一个世界从此转动；
王冠潜底，一条定理浮出水面。

苹果落地，人类飞向太空；

蝴蝶振翅，风云为之色变。

三棱镜中折射出七色彩虹；

大荒原上升腾起蘑菇烟尘。

是什么揭示了世界的奥秘？

是什么改变着我们的生活？

是什么推动着人类文明的进步？

是漆黑长夜的霓虹再现？

还是几万里光缆双手相牵？

是排云而上的飞机？

是响彻太空的东方红？

还是铁轨上磁悬浮列车的呼啸？

是物理学！

正是物理学奠定了自然科学的基础，解释了我们的世界！

《物理学照亮世界》这首小诗，生动形象地说明了物理学中阿基米德的杠杆原理和浮力定律、牛顿万有引力定律、光的色散原理、混沌、爱因斯坦质能关系、辉光放电原理、光纤原理、磁悬浮原理等物理学原理对人类生活、科技、文明的影响，也说明了没有物理学就没有我们今天高度发达的科学技术和对宇宙的认知。

2016年2月11日，位于美国加州理工学院（Caltech）和麻省理工学院

(MIT) 的合作实验室的激光干涉引力波观测站 (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) 科学合作组织和 Virgo 合作团队宣布, 他们已经利用高级 LIGO 探测器, 首次探测到了来自双黑洞合并的引力波信号, 如图 2-1 所示。这次探测的引力波来自 13 亿光年之外的两个分别为 29 个太阳质量与 36 个太阳质量的黑洞, 它们合并成一个 62 个太阳质量的黑洞, 损失的 3 个太阳质量的能量以引力波的形式释放出去。激光干涉引力波观测平台的两个探测器同时观测到一个引力波瞬态事件, 与爱因斯坦广义相对论预言的一对互相旋转的黑洞并合成一个黑洞的计算相符合, 类似事件的误报率为 $1/203000$ 。这是人类首次证实恒星级双黑洞系统存在, 也是人类首次直接探测到引力波。

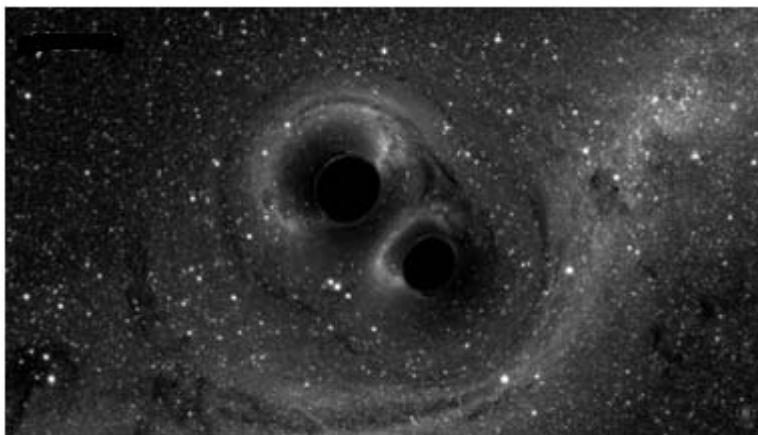


图 2-1 双黑洞合并产生引力波

2017 年, 诺贝尔物理学奖毫无悬念地颁给了美国科学家雷纳·韦斯、巴里·巴里什和基普·索恩, 以表彰他们为“激光干涉引力波天文台”项目和发现引力波所做的贡献, 从而再一次将物理学推向热点。黑洞和引力波的概念都是物理学理论的预言, 1915 年广义相对论问世, 其预言的实验结果逐渐被一一证实, 而引力波的预言被证实则经过了 100 余年, 我们不得不为物理

学理论的高深精妙感到叹服，同时，谁又能想到这些结论会带给未来什么样的改变呢？

本部分以黑洞为主线，以宇宙形成为出发点，从恒星演化的实际过程和广义相对论的理论过程两方面，介绍如何走向宇宙中最为神秘的天体——黑洞，然后介绍黑洞的部分特性。

第一节 宇与宙

2000 多年前，中国的《淮南子》中写道：“四方上下曰宇，古往今来曰宙。”宇宙本身超越其他任何问题，是对人类最重要的问题。许多物理学家为其进行了艰苦的探索，并取得卓越的成果，如牛顿、莱布尼茨在研究空间天体的运动中各自创立了微积分，它是高等数学的基础主体。引力物理学、热学、光学、粒子物理学、核物理学、相对论等都与宇宙的研究有密切的联系。

对遥远处宇宙的研究目前只能通过观测，借助于星系发出的光线或射电。宇宙不是静态的，是演变着的。明日的太阳不同于今日，亦如今日的太阳不同于昨日，能量正在减少。宇宙本身及其演化方向、过程与人的愿望无关，人择原理是不科学、不唯物的。千百年后的人类除技术高度发达外，思维观念也会有本质突破，而宇宙的演化是不独为人的。

1929 年，哈勃发现河外星系的视向退行速度 v 与其至地球的距离 D 成正比，即

$$v = H_0 \cdot D \quad (2-1)$$

上式称为哈勃定理， H_0 为哈勃常数。哈勃及后来的科学家观测表明：来自遥远星系的光谱的吸收线均向红色边位移，即红移。根据多普勒效应，这些星系正在远离我们向后退行，退行的速度可由钙的 H 线和 K 线在光谱中红移量的大小算出。

部分星系退行速度与距离的关系如图 2-2 所示，星系离我们越远，其退行速度就越大。当速度在 10 万千米/秒以上时，虽然哈勃定理的线性关系不完全适用，要代之以相对论公式，但距离越远的星系，其退行速度越大是正确的。光速是极限值，以接近光速退行的星系，距离我们 150 亿光年或 200 亿光年。

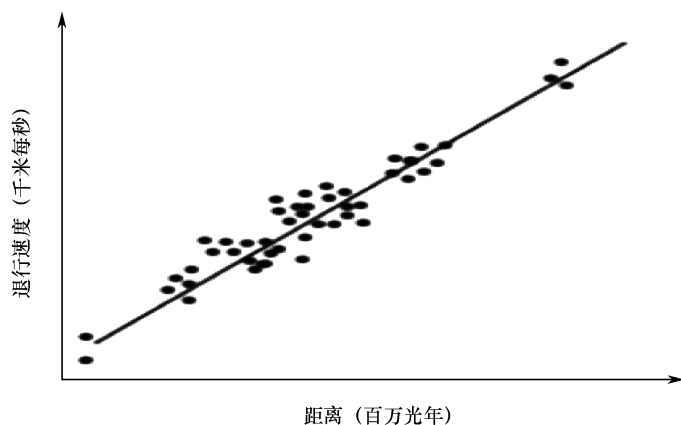


图 2-2 部分星系退行速度与距离关系图

由狭义相对论可得出光速不变性和极限性，光线通过的空间 L 与时间 t 的关系为

$$L = ct \quad (2-2)$$

式中， c 为光速，通常我们目视夜空，认为看到的星光 是星体现在发出的光（暗含 c 无限大）。其实不然，若观测到 100 亿光年处的星体，则是 100 亿年前它发出的光。这束光在宇宙空间中，以光速穿行了百亿年的时间，经历了百亿光年的空间，即时空连续一体。我们看到的星系是过去的星系，看到的宇宙是过去的宇宙，看得越远就看得越早，而现在遥远星系的情况，则要过上百亿年的时间，光线到达后才能观测到。

观测是有限的，宇宙可能是无限的。观测边缘的星系以接近于光速远离退行，出了我们的视界线，宇宙本体的物质构成，限制了宇宙的观测。

宇宙学中最为热点的问题是宇宙的形成与年龄。在宇宙起源上，最早为宇宙建立数学模型的是数学家弗里德曼，但其理论涉及的仅是宇宙的几何性质及空间随时间变化的膨胀动力学。比利时神父勒梅特提出，现在的宇宙是由一个“原始原子”爆炸而成的。这可以说是宇宙大爆炸学说的前

身。1948 年，伽莫夫（苏联物理学家，1933 年离开苏联定居美国）提出，宇宙早期没有星系，也没有恒星，显然不是勒梅特说的“原始原子”，而应该是一个温度极高、密度极大的由质子、中子和电子等基本粒子组成的“原始火球”。这个火球迅速膨胀，密度和温度不断降低，然后才形成化学元素及各种天体，最后演化成我们现在的宇宙，这就是宇宙大爆炸学说。有趣的是，“宇宙大爆炸”的名字却来自于它的反对派——英国物理学家霍伊尔，霍伊尔坚持“稳恒态宇宙模型”。大爆炸理论认为，宇宙在时间上有起点，稳恒理论则认为，宇宙无始无终，一直都在膨胀，并且新的物质不断从无到有地产生。霍伊尔认为，宇宙从“原始火球”开始的膨胀无异于一次大爆炸，这句玩笑或嘲笑的话却成了伽莫夫理论的名字。尽管霍伊尔一直坚持，至死不认同，但随着实验对大爆炸模型的验证（尤其是三大支柱：哈勃观测到的宇宙膨胀、宇宙微波背景辐射的发现，以及太初核合成理论对元素丰度的预测），让现代天体物理学普遍认为大爆炸模型揭示的是宇宙形成较真实的情景。

1986 年 8 月下旬，国际天文学联合会第 124 次观测宇宙学讨论会在北京举行。这次会议上宣布了宇宙年龄的最好结果是 140 亿~200 亿年。但近几年通过对几个河外星系中造父变星（变星是发出的光有周期性变化的恒星，有一类变星的发光规律非常确定，称为造父变星）的观测却产生了宇宙年龄危机的新问题。例如，对星系 M100 内的 20 颗造父变星光变数据测定得出哈勃常数为

$$H_0 = 80 \pm 17 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

秒差距是物理学中更常用的距离单位，用 pc 表示，意义是：从一个远方星体上来看地球和太阳，太阳与地球之间的最大张角为 1 角秒时，这个星球和地球的距离是 1pc，如图 2-3 所示，1pc 约为 3.259 光年。

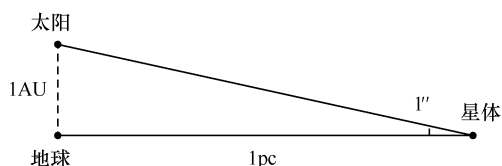


图 2-3 秒差距的定义

通过对星系 NGC4571 内的 3 颗造父变星的光变数据测定，得出哈勃常数为

$$H_0 = 87 \pm 7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

通过对星系群猴子/中星系 M96 内的造父变星的光变数据测定，得出哈勃常数为

$$H_0 = 69 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

按照宇宙创生热大爆炸模型（标准模型），如果物质是均匀膨胀的，而彼此间又没有引力等相互作用，则 H_0 的倒数就直接给出了宇宙的年龄，即哈勃年龄。取 $H_0 = 87 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ，则

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{1}{H_0} = \frac{3.26 \times 10^6 \times 9.46 \times 10^{12}}{87} \text{ 秒} \\ &= \frac{3.26 \times 10^6 \times 9.46 \times 10^{12}}{87 \times 365.23 \times 86400} \text{ 年} \\ &\approx 115 \text{ 亿年} \end{aligned} \quad (2-3)$$

这里取

$$1 \text{ 秒差距} = 3.26 \text{ 光年}$$

$$1 \text{ 光年} = 9.46 \times 10^{12} \text{ 千米}$$

$$1 \text{ 回归年} = 365.23 \text{ 天}$$

$$1 \text{ 天} = 86400 \text{ 秒}$$

若取 $H_0 = 69 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ，则 $T_0 = 145 \text{ 亿年}$ 。

另外，天文学家一致认为，球状星团是我们银河系中最古老的天体，因为星团中恒星的低金属含量表明它们属于从原星系凝聚出来的第一代恒星。利用球状星团的赫罗图（下文将详细介绍）可以推算出星团和银河系的年龄

为 130 亿~180 亿年，至少不少于 114 亿年。由此按标准模型，可得出宇宙年龄比宇宙中最古老天体年龄小的谬论。

对星系 NGC4571 中的 3 颗造父变星的观测表明，对于退行速度较大的遥远星系要考虑到相对论效应和时空弯曲，以及星系分布的不均匀性对所测星系红移值的影响，星系红移量子化现象也不可忽视。这些问题使不少人认为哈勃常数不可能有定值，而是随被测星系的距离和方向有所不同。因此，哈勃年龄也不可能有定值。1993 年，以葡萄牙科学家伯托拉米为首的小组提出，控制着引力强度的牛顿万有引力常数不是固定不变的。在星系和星系团尺度上的引力强度要大于太阳系内的引力强度。如果引力常数随空间尺度的增大而增大，则宇宙的膨胀速率有赖于所观测空间的体积，从而得出哈勃常数是一个随空间尺度而变化的量的结论，故不可能从哈勃常数推导出宇宙年龄。

诚然，至今我们还远未弄清宇宙起源的细节，但已获得的所有观测资料都指向一个“热”的开端。1989 年 11 月 18 日，美国宇航局发射的“宇宙背景”探测器收集到的数据无可辩驳地表明宇宙曾经是较热的，H 同位素的相对丰度和河外星系光谱线都表明，宇宙创生热大爆炸模型能更好地说明这些。宇宙大爆炸学说也要受到新观测事实的考验并不断改变和充实，不能因为年龄矛盾而全盘否定其标准模型。

第二节 恒星演化，走向黑洞

一、赫罗图

赫罗图（Hertzsprung-Russel diagram, H-R diagram）由丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文学家罗素分别于 1911 年和 1913 年各自独立提出。后来的研究发现，这张图是研究恒星演化的重要工具，因此这张图以当时两位天文学家的名字来命名，称为赫罗图。赫罗图是恒星的温度光谱类型与光度绝对星等之间的关系图，如图 2-4 所示。赫罗图的左侧纵轴是光度，反映了恒星的发光能力；同样能反映发光能力的是绝对星等，因此右侧纵轴是绝对星等；而下面的横轴是恒星的表面温度，从左向右递减；因为恒星的光谱类型与表面温度有关，上面的横轴则是光谱类型，恒星的光谱类型可大致分为 O、B、A、F、G、K、M 这七种。要记住这些光谱类型有个窍门，据说一位年轻人第一次登上天文台观测，五颜六色的天体让他惊叹道“*Oh be a fine girl, kiss me!*”（哦，真像一个美丽的仙女，吻我一下吧！），这句话的英文单词首字母就是个简单的英文口诀。

赫茨普龙和罗素先后发现恒星的光度与表面温度有一定的联系。他们把大量的恒星按照它们各自的光谱类型和绝对星等在图上点出来，发现点的分布有一定的规律性。图的左上方到右下方（大致沿着对角线），点的分布很密集，呈带状，占总数的 90%，天文学家把这条带称为主星序，带上的恒星称为主序星。主星序表明：大多数恒星，表面温度高，则光度也大；表面温度降低，则光度随之减小。但是，在图的右上方，有一个点分布比较密集的区域，这里的恒星光度很大，但表面温度却不高，呈红色，这表明它们的体积十分巨大，所以称为红巨星，红巨星的上面是红超巨星。图的左下方也有一个点分布比较密集的区域，这里的恒星表面温度很高，呈蓝白色，光度却很小，这表明它们的体积很小，所以称为白矮星。

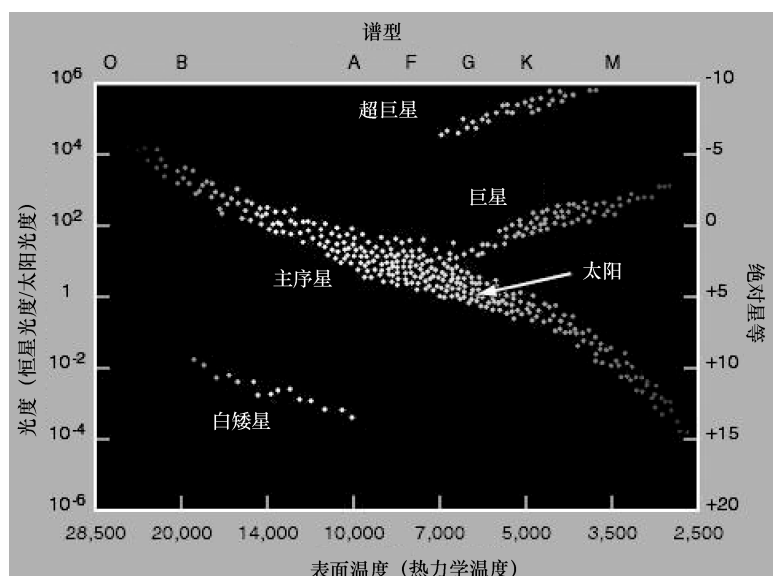


图 2-4 赫罗图

主星序上的恒星比较年轻，老年恒星离开主星序，先演化成红巨星或红超巨星，再进一步演化成白矮星或其他致密星体。因此，这张图反映了恒星演化的一种规律性，我们可以通过恒星处于这张图的哪个位置得知它演化到了哪种程度，赫罗图从而成为天文学家研究天体演化的重要工具。

银河系中有千亿颗恒星，它们的特性千差万别。恒星的光度是表现它们特性的一个重要物理量。赫罗图的纵坐标是恒星的光度，那么什么是光度呢？物理学定义的光度是恒星每秒辐射出的总能量，以“尔格/秒”为单位。天文学家把光度大的恒星称为巨星，光度比巨星更强的恒星称为超巨星，光度小的称为矮星。

恒星之间的光度差别非常大。恒星的光度即恒星的真实亮度，“视星等”则定义为扣除了大气的影响，天体相对于地面观测者的表现亮度。视星等采用对数标度，其中肉眼所能看到的最暗天体定义为 6 等，比这一天体亮 100 倍的天体定义为 1 等，中间有 5 个等级。视星等数越小，亮度越大。太阳的视星等为 -26.73，哈勃望远镜所能观测的最暗天体的视星等为 30。

我们也看到，用恒星的视星等来反映恒星的光度是不公平的，肉眼所见的恒星亮度不仅取决于星体本身，而且取决于它们离我们的远近。同样种类和大小的恒星，离我们越近，显得越亮，因此我们用“绝对星等”来显示它们的光度。通过天文观测，可以知道恒星离我们的距离。我们把所有恒星都折算到离我们 10pc 的距离，它们这时候显示的亮度，称为绝对星等。绝对星等反映了恒星的真实发光本领，也就是设想把恒星都放在 32.59 光年（10pc）的地方所得出的亮度，它们之间的数学关系为

$$M = m + 5 - 5 \lg r \quad (2-4)$$

式中， M 表示绝对星等， m 表示视星等， r 表示恒星的距离化成秒差距时的数值。绝对星等值越低，代表天体越亮。由于距离较远，许多恒星的绝对星等要比其视星等小很多（实际比看起来更亮）；而有些恒星由于距离我们较近，其绝对星等会比可视星等大很多（看起来比实际更亮）。

织女星的绝对星等为 0.5，它的光度是太阳的 50 倍；超巨星“天津四”的绝对星等约为 -7.2，其光度比太阳强 5 万多倍；还有一颗在星空中极不起眼的天蝎座，视星等只有 3.8，但它的绝对星等为 -9.4，它的光度几乎是太阳光度的 50 万倍；最强的恒星的光度甚至是太阳的 100 万倍。太阳是一颗黄色的矮星，相比之下光度较弱。但还有比它更弱的矮星，如著名的天狼星伴星（天狼 B 星）是一颗白矮星，它的光度还不到太阳的万分之一；还有绝对星等为 20 左右的暗弱恒星，它们的光度大约仅为太阳的五十万分之一到四十万分之一。

恒星的光度与它的体积有关，光度大的巨星，体积也大，光度小的矮星，体积也小。恒星的大小相差很大，太阳的直径是地球的 109 倍，巨星是恒星世界中个头最大的，其直径比太阳大几十到几百倍，超巨星则更大，红超巨星“参宿四”的直径是太阳的 900 倍。一颗名为“柱一”的双星，其伴星的直径是太阳的 2000~3000 倍。比太阳小的恒星也有很多，其中最突出的属白矮星和中子星。白矮星的直径只有几千千米，和地球差不多，而中子星的直

径则只有 20km。恒星的体积相差极大，而它们的质量却差别不太大，大多数恒星的质量为太阳质量的 0.5~5 倍。质量最大的恒星，其质量比太阳大几十倍；质量最小的恒星，其质量也有太阳质量的几十分之一。

光谱类型和表面温度之间存在对应的关系。恒星是一团炽热的气体，是一团被自身引力束缚的气体，它们的中心区域密度和温度都特别高，足以产生热核反应。恒星表面的高温使之发射类似黑体辐射的光谱。在很宽的频率范围内都有辐射，因此称为连续谱。光谱曲线的峰值和形状由物体的温度决定，不同频率的光，其颜色不同。恒星的颜色多种多样，从恒星的颜色可以判断出它们的温度。表面温度 30000K 以上的恒星发蓝光，10000~30000K 的恒星发蓝白颜色光，7500~10000K 的恒星发纯白颜色光，6000~7500K 的恒星呈黄白色，5000~6000K 的恒星颜色发黄，3500~5000K 的恒星颜色为红橙，2000~3500K 的恒星颜色发红。

由于恒星内部能源的不断消耗，它要发生演化，光度和温度都要发生变化，这导致其在赫罗图上的位置发生变化。形成恒星的分子云位于图中极右的区域，但随着分子云的收缩，其温度开始上升，会慢慢移向主序带。可以看出，约 90% 的恒星位于赫罗图左上角至右下角的主序带上。恒星临终时会离开主序带，向右上方移动，这里是红巨星及红超巨星的区域，都是表面温度低而光度高的恒星。经过红巨星但未发生超新星爆炸的恒星会越过主序带移向左下方，这里是表面温度高而光度低的区域，是白矮星所在的区域，接着会因为能量的损失，渐渐变暗成为黑矮星。那么问题是，经过红巨星发生超新星爆炸的恒星，其结局会是怎样？目前我们的认知是，其会演化成中子星或黑洞。

天文学家根据赫罗图描绘了恒星从诞生、成长到衰亡的演化路径，并从理论上给出了恒星从诞生到主序星、红巨星、变星、新星（超新星）、致密星（白矮星或中子星或黑洞）的演化机制和模型，这是人类认识恒星世界奥秘的一个重大突破。

是什么导致恒星发生这样的演化呢？我们从恒星内部的变化说起。

二、恒星的能量

恒星对外都在发光发热，上一部分我们讲过地球的适宜温度来自地球位于太阳恒星系统的合适位置。那么恒星为什么会发光发热？其能量来自于哪里？最初以赫姆霍兹和开尔文等为代表的物理学家们认为，恒星的能量完全来自引力势能。恒星物质继续坍缩，引力势能转化成热能，使恒星温度升高，发光发热。而且他们认为，维持这一发光发热的能量依然来源于引力势能，



来源于恒星物质的继续坍缩。也就是说，引力势能是恒星热能和光能的唯一来源，最早有很多物理学家持这一观点。

然而后来发现，恒星的寿命长达几十亿年，恒星物质的引力势能远不能维持如此长时间的发光发热。英国天体物理学家爱丁顿（如图 2-5 所示）认为，恒星的能量是核的聚变反应也就

图 2-5 英国天体物理学家爱丁顿 是热核反应。

很多物理学家认为热核反应需要较高的温度，而恒星内部温度不够高，不可能形成氢聚合成氦的热核反应。爱丁顿鼓励他的团队时回答：“我们不同那些说恒星温度不够高的批评者争辩，我们只告诉他们，往前走，去找为什么有更高温度的理由。”

历史证明爱丁顿是正确的，恒星坍缩可以使其中心温度非常高，同时压力非常大，使质子的动能达到足以克服它们之间的静电斥力，相互靠近，发生热核反应的程度。热核反应的公式为



即 4 个氢核（质子），聚合生成一个氦核（由 2 个质子和 2 个中子组成）、2 个

正电子和 2 个中微子，并释放出核能。

爱丁顿使学术界认识到，恒星的能量不是引力势能，而是核的聚变反应。万有引力势能的作用仅限于“点火”，即原来温度不太高，不会产生聚变反应的恒星物质，在万有引力作用下坍缩，引力势能转化成热能，使恒星温度不断升高，压强不断增大，直到恒星中心部分的温度和压强达到诱发热核反应的程度，完成聚变反应的点火。此后，使恒星发光发热的就不再是引力势能，而是核能。

前文我们提到，英国天体物理学家霍伊尔（如图 2-6 所示）发展了爱丁顿的思想，首先认识到氦元素还能进一步发生聚变反应，生成碳、氧；碳、氧进一步聚变反应，生成更重的元素铁、硅等。这不仅解释了恒星发展各个阶段的产能机制（例如白矮星、中子星的形成，以及超新星的爆发过程），而且解释了宇宙中重金属的来源，即宇宙初期只有氢和氦两种元素，而现在则存在很多重元素（铁、硅等），霍伊尔的工作解开了这些元素由来的秘密。



图 2-6 英国物理学家霍伊尔

霍伊尔猜测，碳核可能存在一个激发态，其能量恰好与 3 个氦核加起来的总能量相等，这时候碳核与 3 个氦核之间会有一种“共振反应”，使聚合概率大大提高。生成的激发态碳核又会很快跃迁到基态，形成稳定的碳核，这样氦聚合成碳元素的聚变反应就得以进行。

研究表明，氧还可以再进一步与氦聚合……这样一步步聚合下去，生成各种重元素。各种重元素与氦或氢进一步聚合，生成更重的元素。各种聚变反应就像一架天梯，各种元素的核与一个氦核或一个氢核聚合，就迈上一个梯阶，聚合成更重元素的核。

由此可知，发生超新星爆炸的恒星，其结局会成为中子星。是不是仅仅如此呢？

可以看出，霍伊尔的工作是诺贝尔奖级别的，然而 1983 年的诺贝尔物理学奖颁给了美国物理学家威利·福勒和印度物理学家钱德拉塞卡，后者我们后面再来介绍，而威利·福勒是与霍伊尔合作的伙伴（霍伊尔提供了原创性的思想，福勒只是提供了基本数据，无疑福勒他自己也承认在此方面霍伊尔的贡献更大），表彰福勒在揭示元素恒星起源方面的贡献，这一结果引发学界一片争议。原因普遍被认为是霍伊尔个性固执，曾因中子星的发现没有授给首次发现者女研究生贝尔却给了她的导师休伊什而炮轰诺贝尔奖组委会，这一倔强的性格让他付出了代价。不过，英国著名宇宙学家，被认为是爱因斯坦接班人的霍金在考入剑桥读博士时，曾经想师从霍伊尔研究宇宙学，遭到了拒绝。但霍金因为对宇宙学的兴趣发现了霍伊尔的理论计算错误，并在一次学术会议上当众指出，让霍伊尔极为恼火，两人更是在宇宙起源的模型上争执不休。尽管霍伊尔过分固执和顽固不化的态度不可取，但其贡献和对学术直率、较真的性格仍不失为一位伟大的物理学家。

三、恒星演化过程

由于引力的控制，恒星演化的总趋势是密度增大，而质量丢失，碎裂、不稳定或爆炸等现象使其质量减小。目前已知的恒星的演化必定以三种可能的冷态之一为终结：白矮星，中子星，黑洞。由于单一恒星的演化通常长达数十亿年，人类不可能完整观测，目前只能以计算机模型来模拟恒星的演化过程。

1. 诞生

恒星的演化开始于巨分子云。

一个星系中大多数虚空的密度是 $0.1\sim 1$ 个原子每立方厘米，但是巨分子云的密度是数百万个原子每立方厘米。一个巨分子云包含数十万到数千万个太阳质量，直径为 $50\sim 300$ 光年。

在巨分子云环绕星系旋转时，一些事件可能造成它的引力坍缩。巨分子云可能互相冲撞，或者穿越旋臂的稠密部分。邻近的超新星爆发抛出的高速物质也可能是触发因素之一。最后，星系碰撞造成的星云压缩和扰动也可能形成大量恒星。

宇宙间遵循着三大守恒定律：动量守恒、角动量守恒、能量守恒。坍缩过程中的角动量守恒会造成巨分子云碎片不断分解为更小的片段，质量小于 50 个太阳质量（记为 M_{\odot} ）的碎片会形成恒星。在这个过程中，气体被释放的势能所加热，而角动量守恒也会造成星云开始产生自转，之后形成原始星。

恒星形成的初始阶段几乎完全被密集的星云气体和灰尘所掩盖。通常，正在产生恒星的星源会通过四周光亮的气体云上造成阴影而被观测到，称为博克球状体。

质量非常小（小于 $0.08M_{\odot}$ ）的原始星的温度不会到达足够开始核聚变的程度，它们会成为褐矮星，在数亿年的时光中慢慢变凉。大部分质量更高的原始星的中心温度会达到 1000 万开氏度，这时氢会开始聚变成氦，恒星开始自行发光。核心的核聚变会产生足够的能量阻止引力坍缩，达到一个静态平衡，恒星从此进入一个相对稳定的阶段。如果恒星附近仍有残留巨分子云碎片，那么这些碎片可能会在一个更小的尺度上继续坍缩，成为行星、小行星和彗星等行星际天体。如果巨分子云碎片形成的恒星足够接近，那么还可能形成双星和多星系统。

2. 成年期

成年期时形成主序星。

恒星有不同的颜色和大小，从高热的蓝色到冷却的红色，从 0.5 到 20 个

太阳质量。恒星的亮度和颜色依赖于其表面温度，而表面温度则依赖于恒星的质量。大质量的恒星需要比较多的能量来抵抗对外壳的引力，燃烧氢的速度也快得多。

恒星形成之后会落在赫罗图主星序的特定点上。小而冷的红矮星会缓慢地燃烧氢，可能在此序列上停留数千亿年，大而热的超巨星会在仅仅几百万年之后就离开主星序。像太阳这样的中等恒星会在此序列上停留 100 亿年左右。太阳也位于主星序上，被认为是处于中年期，在恒星燃烧完核心中的氢之后，就会离开主星序。

3. 中年期

中年期时形成红巨星、超巨星。

在恒星形成几百万到几千亿年之后，会消耗完核心中的氢。大质量的恒星会比小质量的恒星更快消耗完核心的氢。在消耗完核心中的氢之后，核心部分的核反应会停止，而留下一个氦核。

失去了抵抗重力的核反应能量之后，恒星的外壳开始引力坍缩。核心的温度和压力像恒星形成过程中一样升高，但是在一个更高的层次上。一旦核心的温度达到了 1 亿开氏度，核心就开始进行氦聚变，重新通过核聚变产生能量来抵抗引力。恒星质量不足以产生氦聚变的，会释放热能，逐渐冷却，成为白矮星。

炽热的核心会造成恒星大幅膨胀，达到在其主星序阶段的数百倍大小，成为红巨星。红巨星阶段会持续数百万年，但是大部分红巨星都是变星，不如主序星稳定。

恒星的下一步演化再一次由恒星的质量决定。

4. 衰退期

一些恒星会在核心进行氦聚变，产生一个不稳定和不平衡的反应，以及

强烈的恒星风。在这种情况下，恒星不会爆发形成行星状星云，而只会耗尽燃料形成红矮星。

但是小于 $0.5M_{\odot}$ 的恒星甚至在氢耗尽之后都不会在核心产生氦反应。像比邻星这样的红矮星寿命长达数千亿年，在核心的反应终止之后，红矮星在电磁波的红外线和微波波段逐渐暗淡下去。

达到红巨星阶段时， $0.4\sim 3.4M_{\odot}$ 的恒星即中等质量恒星的外壳会向外膨胀，而核心向内压缩，产生将氢聚变成碳的核反应。聚变会重新产生能量，暂时缓解恒星的死亡过程。对于太阳大小的恒星，此过程大约持续 10 亿年。

氢的燃烧对温度极其敏感，会造成很大的不稳定。巨大的波动会使得外壳获得足够的动能脱离恒星，成为行星状星云。行星状星云中心留下的核心会逐渐冷却，成为小而致密的白矮星，其质量通常为 $0.6M_{\odot}$ ，但是只有一个地球大小。

在重力和电子互斥力平衡时，白矮星是相对稳定的。在没有能量来源的情况下，恒星在漫长的岁月中释放出剩余的能量，逐渐暗淡。最终，释放完能量的白矮星会成为黑矮星。

在同时形成的双星或者多星系统中，恒星间质量交流可能改变其演化过程。因为一部分质量被其他恒星获得，系统中质量较大的恒星的红巨星阶段演化会被加速，而质量较小的恒星会吸收一部分红巨星的质量，在主星序停留更长时间。举例来说，天狼 B 星就是一颗年老的质量约为 $1M_{\odot}$ 的白矮星，但是天狼星是一颗质量约为 $2.3M_{\odot}$ 的主序星。如果白矮星的质量超出钱德拉塞卡极限 ($1.4M_{\odot}$)，电子互斥力将不足以抵抗引力，而继续坍缩下去。这会造成恒星向外抛出外壳，也就是超新星爆发，标志着恒星的死亡。也就是说，不会有质量大于 $1.4M_{\odot}$ 的白矮星 ($1.4M_{\odot}$ 是指核心的质量，原星质量约为 $3.5M_{\odot}$)。如果白矮星和另外一颗恒星组成双星系统，那么白矮星可能使用来自另外一颗恒星的氢进行核反应并且将周围的物质加热抛出，使白矮星的质

量低于 $1.4M_{\odot}$ ，这样的爆炸称为新星。

原星质量超出 $3.5M_{\odot}$ 的恒星为大质量恒星，其外壳膨胀成为红超巨星之后，核心开始被重力压缩，温度和密度的上升会触发一系列聚变反应。这些聚变反应会生成越来越重的元素，产生的能量会暂时延缓恒星的坍缩。

最终，聚变逐步到达元素周期表的下层，硅开始聚合成铁。在这之前，恒星通过这些核聚变获得能量，但是铁不能通过聚变释放能量，相反，铁聚变需要吸收能量，这会造成没有能量来对抗重力，核心几乎立刻坍缩。

恒星演化的下一步并不明确，但是这会在几分之一秒内造成一次剧烈的超新星爆发。被抛出的中微子和轻于铁的元素同时形成一个冲击波，在被抛出的物质吸收后，形成一些比铁重的放射性元素，其中最重的是铀。超新星爆发，是形成相对分子质量比铁大的元素的另一途径（重元素最主要的来源被认为是宇宙大爆炸）。

中微子冲击波继续将被抛出的物质推出，被抛出的物质可能和彗星带碰撞，形成新的恒星、行星和卫星，或者成为各种各样的天体。

现代科学尚未明确超新星爆发的机制，以及恒星残骸的成分，但是已知有两种可能的演化终点：中子星和黑洞。

在一些超新星之中，电子被压入原子核，和质子结合成为中子。使原子核互相排斥的电磁力消失之后，恒星成为一团密集的中子，这样的恒星称为中子星。中子星的质量要求：坍缩的内核质量大于 $1.4M_{\odot}$ ，小于 $3.2M_{\odot}$ （奥本海默极限，此值在给出时不太精确，现在认为该值为 $2\sim 3M_{\odot}$ ）。

中子星的大小不超过一个大城市，但是极其致密。由于大部分角动量残留在恒星中，它们的自转会极快，有些甚至达到 600 转每秒。恒星的辐射会被磁场局限在磁轴附近，并随恒星旋转。如果磁轴在自转中对准地球，那么在地球的每次自转过程中都可能观测到一次恒星的辐射，这样的中子星称为

脉冲星，也是最早被发现的中子星。

被广泛承认的是，并非所有超新星都会形成中子星。如果恒星质量足够大，那么连中子也会被压碎，直到恒星的半径小于史瓦西半径（下文将详细介绍），光也无法射出，成为一个黑洞。显然，黑洞的质量要求是：坍缩的内核质量应超过 $3.2M_{\odot}$ ，即大于奥本海默极限，原星质量应大于 $8M_{\odot}$ 。

霍金结合广义相对论和量子力学预测了黑洞的存在。多年来，在天文学家的努力下，成功观测到了行星因不明引力场的影响而改变轨迹，从而可以推论黑洞的存在。根据传统的广义相对论，没有任何物质或者信息可以从黑洞中逃出，但是量子力学允许一些例外（在特定条件下物质发生 Tunnel 现象，物质能够通过一条假想的隧道穿过障碍）。黑洞的存在被绝大部分天文学家支持。

综上所述，恒星演化的各个阶段可总结为图 2-7 所示的过程。

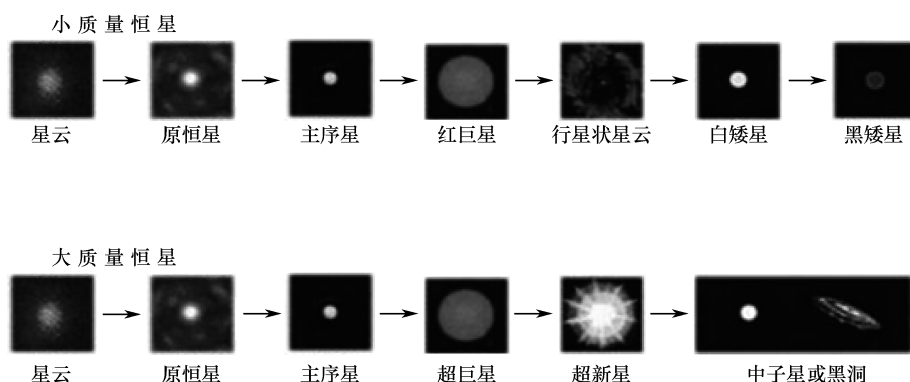


图 2-7 恒星演化各个阶段

但是仍有一些问题尚待解决。当前的超新星爆发理论尚未完善，不能说明恒星是否可能坍缩成为黑洞而不经超新星爆发，是否有超新星形成的黑洞，以及恒星的初始质量和演化终点的关系。

按照天体的质量和化学成分，运用物理定律，可以计算出恒星不同时期的内部结构，即根据恒星中心到表面各层的温度、密度、压力、能流，以及

恒星辐射的总光度和表面温度等物理量，可以确定恒星在赫罗图上的位置；这样还可以得出恒星的结构与物理参量随时间变化的情况，也就得出了恒星演化的过程，也就可以看出恒星在赫罗图上位置的移动，这就是研究恒星演化的基本方法。

把核反应理论应用于恒星演化，计算的结果正好符合观测的数据，证明了这种理论及其应用的正确性。于是，恒星演化理论开始发展起来。

四、钱德拉塞卡与钱德拉塞卡极限

钱德拉塞卡（如图 2-8 所示）是一位印度物理学家。他原本是名有点



图 2-8 印度物理学家钱德拉塞卡

羞涩的印度青年。19 岁那年，他因成绩优异获得政府奖学金，只身乘船前往英国剑桥求学。在长达十几天的漫长航行中，他奇迹般地初步计算出一个结果。在当时，恒星的白矮星阶段被认为是一切恒星演化过程的最终阶段，但是钱德拉塞卡的计算表明，当恒星质量超过某一上限时，它的最终归宿将不是白矮星。

为什么是这样的结果呢？这还要从 20 世纪初发展起来的量子力学说起。根据量子力学，基本粒子可以分为玻色子和费米子，典型代表分别是光子和电子，微观特性的差别是：像电子类的费米子遵循泡利不相容原理，而玻色子则不遵守。在一个原子中不可能有两个或两个以上的电子处于相同的状态，即它们不可能有完全相同的 4 个量子数。这个原理称为泡利不相容原理，它是微观粒子运动的基本规律之一。按照这个原理，电子坚持“独居”的个性，

大量电子在一起时，如同统计意义上的互相排斥，因而便能产生一种能抗衡引力的向外的压力，称为“电子简并压”。

白矮星中原子核提供了大质量和高密度，而电子则以游离的气态产生“电子简并压”，抗衡引力坍缩。钱德拉塞卡的计算表明，白矮星的稳定性有一个质量极限，约为 $1.4M_{\odot}$ 。当恒星质量大于这个极限时，电子简并压力便不能阻挡引力坍缩。因此，我们把 $1.4M_{\odot}$ 称为钱德拉塞卡极限。

经过在剑桥的学习，钱德拉塞卡逐步完善了自己的发现。在 1935 年皇家天文学会的会议上，这名 24 岁的青年终于得到宣读自己论文的机会。

如果一切顺利，他年纪轻轻就将功成名就。然而，事情发生得如此突然。当钱德拉塞卡在会上宣读完自己的论文时，前文我们提到的、当时天体物理学界的权威、为恒星演化理论作出重要贡献的英国天文学家爱丁顿走上讲台，他当众把钱德拉塞卡的讲稿撕成两半，宣称其理论全盘皆错，原因是它得出一个“非常古怪的结论”。听众顿时爆发出笑声。会议主席甚至没有给这位年轻人答辩的机会。会议结束后，几乎所有人都走到钱德拉塞卡跟前，说：“这太糟糕了，太糟糕了……”

“世界就是这样终结的，不是伴着一声巨响，而是伴着一声呜咽。”多年后，钱德拉塞卡仍然记得自己当时的自言自语。

与爱丁顿的争论持续了几年，没有一位权威科学家愿意站出来支持钱德拉塞卡。最后，他终于明白应该完全放弃这个研究课题。1937 年，他到芝加哥大学后不久，就把自己的理论写进一本书中，然后不再去理会它。这一直是钱德拉塞卡的习惯，当一个理论研究完，他就把理论写进书中，然后投入到下一个理论的研究中。

差不多 30 年后，这个后来被称为“钱德拉塞卡极限”的发现得到了天体物理学界的公认。然后又过了 20 年，钱德拉塞卡获得了诺贝尔奖。1983 年，

当他从瑞典国王手中接过诺贝尔奖章时，已是两鬓斑白的垂垂老者。

此时，回顾年轻时的挫折，钱德拉塞卡却有不同的看法。“假如当时爱丁顿同意自然界有黑洞……这种结局对天文学是有益处的。”他说，“但我不认为对我个人有益，爱丁顿的赞美之词将使我那时在科学界的地位有根本的改变……但我的确不知道，在那种诱惑的魔力面前我会怎么样。”

的确，有多少年轻人在功成名就之后，还能长久保持青春活力呢？为何即使是麦克斯韦和爱因斯坦，也同样未能始终如一？

钱德拉塞卡的结论是，这些成功的人对大自然逐渐产生了一种傲慢的态度。这些人以为自己有一种看待科学的特殊方法，并且这种方法一定是正确的。但实际上，作为大自然基础的各种真理，比最聪明的科学家更加强大和有力。

因此他的一生都是谨慎、谦逊和勤奋的。每当他投入工作时，他就会坐在一张非常整齐、清洁的书桌前，寻觅数学的秩序。每天至少工作 12 小时，一周工作 7 天，花费 10 年左右，得到“某种见解”以后才罢休。也就是说，直到宇宙的某个方面完全约化为一组方程时才罢休。然后，他总是把研究的结果写成一本书，就不再关注这个领域，重新埋头研究下去，直到 60 多岁，钱德拉塞卡仍能定期把精力转向以前从未涉足的新领域。

他的教学同样以严谨和一丝不苟著称。据说他的板书和讲稿非常整洁和优美，甚至可以直接用来印刷。一个有名的故事是：20 世纪 40 年代中后期，钱德拉塞卡每星期从叶凯士天文台驱车数百千米到芝加哥大学为只有两名学生的班级上课。而 1957 年的诺贝尔物理学奖，就授予了这个班级仅有的两名学生——杨振宁和李政道。钱德拉塞卡的一生注定是孤独和寂寞的，他远离自己的祖国，研究不被认可，还因肤色遭受歧视，但他不以为意，并以始终如一的优雅默默回应一切。1999 年，一台以“钱德拉塞卡”命名的天文望远镜升空。尽管他经常因做出新的发现而出现在世界各地的新闻报道中，钱德

拉塞卡却并未因此被更多的人提及和了解。因孤独而优雅，或许，只有一名物理学家，才能拥有如此优雅的美感。

五、奥本海默和奥本海默极限

1939 年，美国物理学家奥本海默（如图 2-9 所示）提出，核心质量超过钱德拉塞卡极限但小于 $3.2M_{\odot}$ 的恒星由于其引力巨大，它的最后归宿不是白矮星，它会继续坍缩，原子和原子核均被挤碎，带正电的质子与带负电的电子在强大引力作用下被结合成中性的中子，庞大星体坍缩成为体积极小、质量和密度极大的小球——中子星。因此，我们把 $3.2M_{\odot}$ 称为奥本海默极限。



提起奥本海默，人们总是说他是“原子弹之父”。的确，他是美籍犹太裔物理学家，曼哈顿计划的领导者，美国加州大学伯克利分校物理学教授，1943 年创建了美国洛斯阿拉莫斯国家实验室，1945 年主导制造出世界上第一颗原子弹。然而，我们看到，科学家和政治家不一样，他们热爱科学，研究科学，研究应用，却并没有制造武器的冲动。

1939 年 9 月，第二次世界大战在欧洲爆发，情报也显示，德国已经在海森堡（矩阵力学的创始人，不确定原理的发现者，曾获诺贝尔物理学奖，是当时德国最著名的物理学家）的主持下进行原子弹的研究。美国总统罗斯福下达总动员令，成立了最高机密的曼哈顿计划，目标是赶在德国之前制造原子弹。主持人雷斯理·格劳维斯少将，不顾陆军情报单位的反对，选定奥本海默为发展原子弹计划的主任。如此迅速地把刚刚于 1939 年在实验室里发现

的原子裂变现象，应用于大规模杀伤性武器的研制，众多科学家，包括以和平主义者著称的爱因斯坦在其中都起到了推动作用。他们的动机，主要是纳粹德国对这种武器的加紧研制严重威胁着整个人类文明，但也并不排除奥本海默曾提及的其他原因，如为了早日结束战争，以及对于原子科学的技术应用的好奇和冒险意识等。然而，要把原子核裂变所提供的理论上的可能性，真正变成军事上可靠易行的原子武器，其间所需克服的理论、方法、材料，直到技术工艺上的种种难题，无疑是对人类才智的极大挑战。奥本海默告诉军方，要想制造原子弹，就必须集中一流科学家和最好的设备于一个社区内，并统一指挥、统筹。

1942年8月，奥本海默被任命为研制原子弹的“曼哈顿计划”的实验室主任，在新墨西哥州沙漠建立了洛斯阿拉莫斯实验室，整个计划的经费是20亿美元，总工作人数为10万。“氢弹之父”泰勒协助奥本海默组织在罗萨拉摩斯工作的团队，1943年，4000名科学家进驻洛斯阿拉莫斯，著名科学家费米、玻尔、费曼、冯纽曼等大师级物理学家皆在其内，开始了原子弹的研发工作。

接着，洛斯阿拉莫斯实验室成功地制造了第一批原子弹，随后在阿拉摩高德沙漠上空引爆，发出了耀目的闪光，冒起了巨型蘑菇云。物理学家费米用纸片被冲击波气浪吹出的距离估算出这次原子弹爆炸相当于2万吨TNT爆炸的威力。当原子弹爆炸时，奥本海默想到了古印度《摩诃婆罗多经》中的《福者之歌》：“漫天奇光异彩，犹如圣灵逞威，祇有千只太阳，始能与它争辉。”1945年8月6日上午8时15分17秒，美国在太平洋蒂尼安岛上的空军基地朝日本广岛投下了第一枚原子弹。

面对着成功和荣誉，奥本海默的心情是苦涩而复杂的。科学的目不仅仅在于求真、探索大自然的奥秘，也在于改善人们的生活条件并增进人类福祉。

然而原子弹的研制，却很难与此目标一致，且包含着危及人类自身生存的潜在危险，尤其是当纳粹德国已经战败且已知其并不具备核能力时。当现场目击第一颗原子弹试爆成功所展现的世界末日般的情景时，科学家们体验到的绝不仅仅是成功的喜悦，更有着对于其未来前景难以抑制的恐惧和担忧，因为他们清楚，这个孽障一旦被他们从潘多拉魔盒中亲手“释放”出来，其对于人类生命价值的肆虐和威胁，就不再是他们所能控制和掌握的了。

当原子弹在广岛和长崎被掷下以后，和爱因斯坦一样，奥本海默心中的罪恶感愈发难以解脱。爱因斯坦再次写信给美国总统要求停止原子弹的制造，他忧心忡忡：“我们赢得了战争，却没有赢得和平。”奥本海默作为美国代表团成员在联合国大会上脱口而出：“总统先生，我的双手沾满了鲜血。”气得当时美国总统杜鲁门大叫：“以后不要再带这家伙来见我了。无论怎么说，他不过只是制造了原子弹，下令投弹的是我。”而面对记者，奥本海默则坦言：“无论是指责、讽刺或赞扬，都不能使物理学家摆脱本能的内疚，因为他们知道，他们的这种知识本来不应当拿出来使用。”图 2-10 所示为奥本海默与爱因斯坦。



图 2-10 奥本海默与爱因斯坦

六、天狼星——白矮星的发现

中国古代人很早就发现，东南方的天空中有颗很亮的恒星，称为“天狼星”，如图 2-11 所示。天狼星代表侵略，在其下方有一组连起来像弯弓样的星星，因此，苏轼曾写下“会挽雕弓如满月，西北望，射天狼”的诗句。当时是北宋时期，西夏曾是它来自西北的主要军事威胁。这首词的下篇是希望朝廷能够起用他，他还要为国出力的意思。满月，形容弓弦拉开时的弧形象圆月一样，天狼星用来比喻敌人——西夏。屈原也曾写道“举长矢兮射天狼”，这里以天狼星比拟位于楚国西北的秦国，诗句表达了屈原痛恨秦国对楚国的侵略，他想要亲自上阵，去抗击并消灭给楚国人民带来灾难的秦国的悲壮情怀。

天狼星离地球比较近，约为 9 光年。由于离地球近，所以它的位置变化比较容易发现。天文学家在 1834 年就发现它在绕一个小圆圈作周期运动，而它为什么要转圈呢？



图 2-11 天狼星

万有引力定律告诉我们，如果它在绕一个小圆圈转动，必定还有一颗看不见的伴星，两颗星绕共同的质心转动。1844 年，德国天文学家贝塞尔根据

它的移动路径出现的波浪图形推断天狼星是一颗双星，因为该星在附近空间中沿一条波形轨迹运动，从而得出它有一颗伴星及其绕转周期约为 50 年的结论。我们分别称其为天狼 A 星和天狼 B 星，那么为什么当时观测不到天狼 B 星呢？原因如同两个人在跳交谊舞，女孩一袭白裙，男孩一身黑衣，我们把灯光减弱，在越来越暗时，你会发现，男孩看不到了，看到的就只是女孩一个人在转圈。由此可见，天狼 B 星应该是光度比较小的一颗星星。

这颗伴星于 1862 年被美国天文学家克拉克用他自制的当时最大口径（4.7m）的折射天文望远镜最先观测到。

2005 年，一个由多国天文学家组成的研究小组，利用哈勃太空望远镜首次对最近的白矮星——天狼 B 星的质量进行了精确测量。测量结果表明，天狼 B 星的质量几乎相当于太阳的质量，是已知质量最大的白矮星之一。其直径约为 1.2 万千米，小于地球直径，然而这么多物质却被压缩成约为地球的大小，其密度极大，强大的引力场是地球引力场的 35 万倍，表面温度为 2.5 万摄氏度。但是，由于在其内部已经没有能量的生成，天狼 B 星剩余的热量会以辐射的形式放射到外太空，终究会逐渐冷却，此过程需时多于 2 亿年。

一颗恒星要经过主序星和红巨星阶段才会成为白矮星。天狼 B 星成为白矮星时的年龄比它现在的年龄小一半多一点，约为 1.2 亿年前。还是一颗主序星时，它估计有 5 个太阳大。天狼 B 星是红巨星的时候，可能增加了其伴星天狼 A 星的金属量。

白矮星依靠电子间泡利斥力与万有引力相平衡，保持稳定状态。钱德拉塞卡的研究表明，质量小于 $1.4M_{\odot}$ 的白矮星将会一直维持这个稳定状态，并逐渐冷却，形成黑矮星。

黑矮星实际上是由碳和氧组成的巨大金刚石，在宇宙空间飘荡。可惜到今天为止，人类发现的白矮星数量占恒星的十分之一，但没有找到一颗黑矮

星，原因是：宇宙迄今寿命约为 137 亿年，而白矮星冷却到黑矮星大约需 100 亿年，可能目前一颗黑矮星也没有形成。

七、中子星——预言与发现

质量超过 $1.4M_{\odot}$ 而小于 $3M_{\odot}$ 的恒星，不会坍缩成一个点，在万有引力的强大压力下，电子会被压入到原子核中，与核里的质子“中和”成中子，形成一颗主要由中子构成的星——中子星。

20 世纪 20 年代，卢瑟福猜测原子核中存在一种质量与质子相近，但不带电的粒子——中子。

1930 年，德国物理学家博特和贝克用 α 粒子轰击铍时，发现从铍中发射出一种强度不大但穿透力极强的射线。两位物理学家错误地认为他们发现的是高能 γ 射线。

1932 年，约里奥·居里夫妇重复了博特的铍辐射实验，他们的实验条件很好，有强大的射线源，很容易就得到与博特相同的结果。但还是沿着博特的错误思路思考，他们把这一现象解释为光子同质子的康普顿散射。1932 年 1 月 18 日，约里奥·居里夫妇发表了他们的实验结果和评论，由于对理论的轻视，他们白白失去了一次发现中子的机会。

如果从物理学上能量守恒和动量守恒的角度考虑，波长再短的 γ 射线也不可能从石蜡中打出质子。

英国物理学家查德威克看了他们的论文并把论文的内容告诉了卢瑟福。据说卢瑟福听了他们的解释后大声喊道：“我不相信”，查德威克也不相信这种解释，他经过一番思考，随即意识到：反冲质子有这么大的能量绝不可能是光子碰撞的结果，而很可能是 10 年前卢瑟福所预言的“中性粒子”碰撞所致。

1932 年，中子被查德威克发现之后不久，苏联物理学家朗道（如图 2-12 所示）就提出有一类星体可以全部由中子构成，朗道因此成为首次提出中子星概念的学者。

1934 年，巴德和兹威基在《物理评论》上发表文章，认为超新星爆发可以将一颗普通的恒星转变为中子星，而且指出这个过程可以加速粒子，产生宇宙线。



图 2-12 苏联物理学家朗道

1939 年，奥本海默和沃尔科夫通过计算建立了第一个定量的中子星模型，但他们采用的物态方程是理想的简并中子气模型。中子星是处于演化后期的恒星，它也是在老年恒星的中心形成的。只不过能够形成中子星的恒星，其质量更大罢了。根据科学家的计算，当老年恒星的（原星）质量大于 $10M_{\odot}$ 时，它就可能最终变为中子星，而质量小于 $8M_{\odot}$ 的恒星往往只能演化为白矮星。

1967 年，英国剑桥大学女研究生贝尔和她的导师休伊什用射电天线阵列接收外来信号，得到了一个等间隔（1.337s）的脉冲信号，这是一颗脉冲星的脉冲信号，这也是人类首次发现中子星，休伊什因此而获得诺贝尔物理学奖（很多人认为这个奖是不公平的，至少应该由休伊什和贝尔共享）。

当巨大的主序星坍缩成中子星时，恒星具有的磁场在星体坍缩中依然保持。但由于恒星体积大为缩小，原来恒星表面并不惊人的磁场在中子星的表面显得异常强大，使大量电子围绕磁力线转动，产生沿磁轴方向的电磁辐射。这种辐射非常强大，就像探照灯的光柱一样射向宇宙深处。磁轴和自转轴不重合（一般情况下，恒星也是如此），于是这些“光柱”就随着中子星的自转“扫描”地球，每扫描地球一次，我们就接收到一个脉冲信号。因此，脉冲星就是中子星。

八、恒星演化——走向黑洞

首先，我们将前文所讲的内容总结一下。

20 世纪 20 年代初，英国天文学家爱丁顿通过研究认为，恒星在演化后期内部燃料即将耗尽，所产生的能量不足以抵消星体内部物质间的引力，于是体积收缩、密度增大，演化为致密的白矮星。1925 年，天文学家在观测中发现了第一颗白矮星。

1939 年，美国物理学家奥本海默提出，质量很大的恒星由于其引力的巨大，它的最后归宿不是白矮星，它会继续坍缩，原子和原子核均被挤碎，带正电的质子与带负电的电子在强大引力作用下被结合成中性的中子，庞大星体坍缩成为体积极小、质量和密度极大的小球——中子星。同年，印度裔美国天文学家钱德拉塞卡预言：质量小于 $1.4M_{\odot}$ 的恒星将会演化为白矮星；质量大于 $1.4M_{\odot}$ 的恒星或是以大爆发的形式抛掉部分质量后演化为白矮星，或是继续坍缩，经超新星爆发演化为密度更高的中子星或黑洞。1967 年，英国射电天文学家休伊什和他的研究生贝尔发现了第一颗中子星。

20 世纪 50 年代，美国天文学家史瓦西（小史瓦西）预言：超大质量恒星爆发后不断坍缩，当它的引力强到足以使光都不能外逸时，就会成为“黑洞”。1974 年，英国理论物理学家霍金证明：黑洞中将产生正反粒子对，其中的正能粒子会逸出，形成黑洞“蒸发”的现象。据此，天文学家们如今已发现了几个可能是黑洞的天体，但尚无法彻底证实。

1915 年，爱因斯坦广义相对论问世，同年德国天文学家卡尔·史瓦西（老史瓦西）通过计算爱因斯坦方程后，得到了广义相对论场方程的第一个有意义的严格解，从而预言：如果将大量物质集中于空间一点，其周围会产生奇异现象，即在质点的周围存在一个界面——视界，一旦进入这个界面，即使是光也无法逃脱。美国物理学家惠勒将这类天体命名为“黑洞”。

图 2-13 所示为恒星演化的不同结局。质量小于钱德拉塞卡极限，即 $1.4M_{\odot}$ ，原星质量小于 $8M_{\odot}$ 的恒星将会演化为白矮星。白矮星阻止自身发生引力坍缩的外向斥力，主要来源于高密度电子间的泡利斥力。

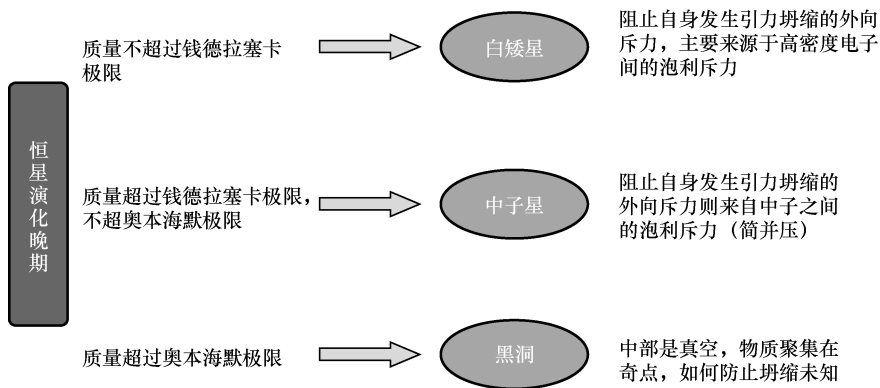


图 2-13 恒星演化的不同结局

核心质量大于 $1.4M_{\odot}$ 而小于 $3.2M_{\odot}$ ，原星整体质量为 $8\sim 15M_{\odot}$ 的恒星将演化为中子星。中子星阻止自身发生引力坍缩的外向斥力则来自中子之间的泡利斥力（简并压）。

核心质量超过 $3.2M_{\odot}$ 的恒星，将演化为黑洞。黑洞中部是真空，物质聚集在奇点，如何防止坍缩未知。

各类恒星半径与密度的对比如表 2-1 所示。

表 2-1 恒星半径与密度的比较

| 名 称 | 主序星（太阳） | 白矮星 | 中子星 | 黑 洞 |
|-----|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 半径 | 70 万千米 | 1 万千米 | 10 千米 | 3 千米 |
| 密度 | 1.4 g/cm^3 | $\sim 1\text{ t/cm}^3$ | $\sim 1\times 10^8\text{ t/cm}^3$ | $\sim 1\times 10^{10}\text{ t/m}^3$ |

可见，黑洞具有更高的密度和强大的吸引力，打个比喻，如果保持质量不变，太阳被压缩到半径为 3km 时，或者地球被压缩到半径为 3mm 时，就变成了黑洞。

人类对恒星演化过程的研究目前尚未完成，探索还将不断地继续下去。

九、关心我们的太阳

1. 太阳会如何演化

太阳处于主序上，是一颗主序星，寿命约为 100 亿年，如今的太阳正值壮年，年龄约为 50 亿年。之后，太阳会演化成红巨星，那时太阳中心部分的氢都聚合成氦，热核反应扩展到外层，太阳体积逐渐增大，温度逐渐降低，颜色越变越红。膨胀的太阳逐渐扩展到水星轨道和金星轨道，把水星、金星吞进去，把地球烤干吞进去，扩展到火星轨道。

那时，肚子里的水星、金星、地球、火星围绕太阳核心转，气体稀薄，生命荡然无存。

前文提到过，红巨星的中部聚集着聚变反应后由氢生成的氦，外部的氢继续进行着聚变反应，生成的氦不断落向中部，使氦组成的中心部分质量不断增加，引力不断增加，温度不断升高，终于点燃了由氦聚合成碳的新聚变反应。当红巨星的核心部分温度突然升高到 1 亿摄氏度左右，就形成了白矮星。因此，太阳的结局将会是白矮星。

2. 太阳演化的结局会不会发生超新星爆发

只有质量超过 $8M_{\odot}$ 的主序星，演化到晚期，才可能发生超新星爆发，成为中子星和黑洞。基于这个角度，太阳是绝对安全的。

3. 宇宙中的超新星爆发会产生什么影响

宇宙中的超新星爆发会产生巨大的影响，主要以下包括三方面。

一是超新星爆发会把重元素崩向宇宙空间，其中许多被年轻的恒星吸引过去，围绕这些恒星转，逐渐形成固体的行星。事实上，所有的固体行星，包括我们的地球，都是由超新星爆发的渣子堆积而成的。

二是超新星爆发会影响到生物进化。爆发时的强大辐射流会使一些物种

灭绝，同时为新物种的诞生和进化创造条件。有一种猜测说地球上的恐龙灭绝，物种突变，是由于离太阳较近的地方发生了超新星爆发。

三是超新星爆发时残留质量超过奥本海默极限的星体，中子间的泡利斥力抵抗不住万有引力，星体将坍缩到它的引力半径之内，即事件视界之内，形成黑洞。黑洞被认为是危险的天体，具有强大的引力，会吞噬一切物质。

由此可见，对正值壮年的太阳的所有担忧都是杞人忧天。50 亿年后，人类会发展和进化到何种程度？是高度文明还是移民其他星球？或者经历毁灭性的撞击？未知的因素太多了。

第三节 广义相对论，走向黑洞

我们知道，黑洞是广义相对论的一个理论预言，之后在研究恒星演化和观测中被逐渐证实。1915 年，爱因斯坦提出广义相对论，认为万有引力不是一种力，而是一种几何效应，是时空弯曲的表现。为了说明广义相对论的基本观点，我们从狭义相对论谈起。

一、经典物理学的困难

蟹状星云来自于大约公元 1063 年的一次超新星爆发，古书《宋会要辑稿》的记载告诉我们，其最亮历时 23 天，后来在两年左右时间后慢慢暗下来直至消失。如果我们以经典牛顿力学的速度合成公式来计算，会得出矛盾的结果，如图 2-14 所示。

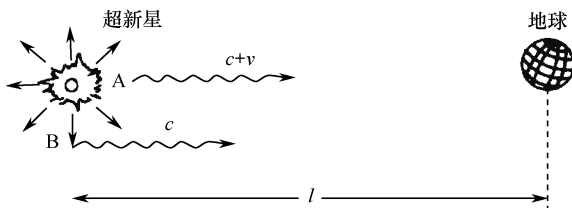


图 2-14 计算超新星爆发时间间隔

一颗超新星爆发时，它外围的物质将向四面八方扩散。有些抛射物是向着地球飞行的（如 A），有些抛射物是横向飞行的（如 B）。如果光速也满足经典速度合成定理，则 A 向地球发射的光线的传播速度为 $c+v$ ，B 向地球发射的光线的传播速度为 c ，它们到达地球所需时间分别为

$$t' = \frac{l}{c+v} \quad (2-6)$$

$$t = \frac{l}{c} \quad (2-7)$$

其他方向抛射物发出的光线到达地球的时间处于两者之间。现代天文学研究表明，星云到地球的距离 $l = 5000$ 光年，抛射物的速度 $v = 1500 \text{ km/s}$ ，则

$$t - t' = \frac{l}{c} - \frac{l}{c + v} = \frac{l}{c} \left(1 - \frac{c}{c + v} \right) = 5000 \left(1 - \frac{c}{c + v} \right) = 5000 \times \left(1 - \frac{3}{3.015} \right) = 25 \text{ (年)} \quad (2-8)$$

这就是说，人们会在 25 年内持续看到超新星爆发时发出的强光。而史书上明明记载，亮光从出现到消失只有两年。这如何解释？

我们知道，大海中轮船激起的波浪的传播速度只与洋流的速度有关，而与轮船的速度无关；声音在空气中传播时的速度与发音物体的状态无关，只与空气有关。这为解释上述疑难提供了一种可能，即超新星发出的光的速度与抛射物的速度无关，只与介质运动状态有关，这样上述矛盾就不复存在。不过产生了一个新的问题：传播光线的介质是什么？人们认为在太空中到处充满了一种物质名为“以太”，以太在太空中绝对静止，光相对于以太的速度为 c 。地球也在以太中运动，应该能感受到以太风的存在。如果在地面上让光线在平行和垂直于以太风的方向上传播，它们应该有不同的速度。

物体在以太中以速度 v 运动，它右端发出的光到达左端时的速度（相对于物体）为 $c + v$ ；左端发出的光到达右端时速度为 $c - v$ 。根据这一原理，迈克尔逊设计了一种巧妙的实验装置，来测量地球相对于以太的速度：

$$v_{\text{地球} \rightarrow \text{以太}} = v_{\text{地球} \rightarrow \text{光}} + v_{\text{光} \rightarrow \text{以太}} = -v + c \quad (2-9)$$

式中， v 表示光相对于地球的速度， c 表示光相对于以太的速度。

1887 年，迈克尔逊和莫雷完成了这个实验，但测量的结果却是地球相对于以太的速度为零，这是历史上一个最著名的零结果实验。

迈克尔逊-莫雷实验令当时大多数从事这方面研究的科学家大失所望。要抛弃以太，是他们难以接受的。于是人们就提出种种假想来拯救以太，例如，洛伦兹提出物体运动时受到压力长度变短（洛伦兹收缩），还有人提出地球在

以太中运动时带动以太一起运动（以太曳引假说）等，但这些理论都不能解释当时所有的实验现象，解释了一个实验，就与另一个实验相矛盾。

当别人忙着在经典物理的框架内用形形色色的理论来修补以太时，爱因斯坦（当时 26 岁）却另辟蹊径，他否定了以太的存在，提出了两个重要的基本假设，并由这两个基本假设出发建立了一整套狭义相对论时空观。

二、迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪值得介绍。迈克尔逊-莫雷利用迈克尔逊干涉仪测量两垂直光的光速差值的著名物理实验，结果证明了光速在不同惯性系和不同方向上都是相同的，由此否认了以太（绝对静止参考系）的存在，从而动摇了经典物理学基础，成为近代物理学的开端。而且迈克尔逊干涉仪迄今为止仍是我们测量微小距离的最为精确的方法和仪器。利用迈克尔逊干涉仪做的标定米尺实验，实现了长度单位的标准化，对近代计量技术的发展作出了重要贡献。迈克尔逊研究了干涉条纹可见度随光程差变化的规律，并以此推断光谱线的精细结构，这是干涉分光技术的最早工作。

迈克尔逊干涉仪是一种分振幅双光束干涉仪，其光路如图 2-15 所示。从光源 S 发出的一束光射到分束镜 G_1 上， G_1 板后表面镀有半反射（银）膜，这个半反射膜将一束光分为两束，一束为反射光（1），另一束为透射光（2），当激光束与 G_1 成 45° 角射向 G_1 时，被分为互相垂直的两束光，它们分别垂直射到反射镜 M_1 、 M_2 上， M_1 、 M_2 相互垂直，则经反向后这两束光再回到 G_1 的半反射膜上，又重新会集成一束光。由于反射光（1）和透射光（2）为两束相干光，因此，我们可在 E 方向观测到干涉现象。 G_2 为补偿板，其物理性能和几何形状与 G_1 相同，且与 G_1 平行，其作用是保证（1）、（2）两束光在玻璃中的光程完全相等。精密导轨与 G_1 成 45° 角，为了使光束（1）与导轨平行，激光应垂直导轨方向射向迈克尔逊干涉仪。反射镜 M_2 是固定不动

的， M_1 可在精密导轨上前后移动，从而改变 (1)、(2) 两光束之间的光程差，干涉条纹可以随之发生移动。通过测量干涉条纹移动情况，能够计算出 M_1 移动的距离。

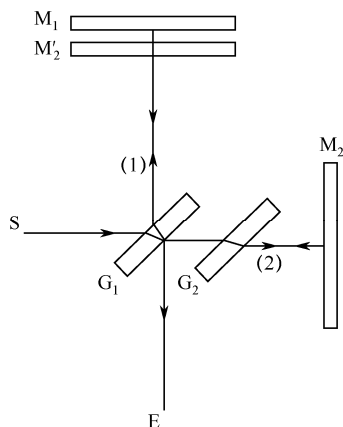


图 2-15 迈克尔逊干涉仪光路图

迈克尔逊干涉仪原理简明，构思巧妙，堪称精密光学仪器的典范。近代干涉仪中有许多都是在迈克尔逊干涉仪的基础上发展起来的，这些干涉仪可准确测定光波的波长、微小长度和透明介质的折射率等，在近代计量技术中得到了广泛应用。迈克尔逊曾于 1907 年获诺贝尔物理学奖。

2017 年，诺贝尔物理学奖表彰了“激光干涉引力波天文台”（LIGO）（如图 2-16 所示）项目为发现引力波所作的贡献。1991 年，麻省理工学院与加州理工学院在美国国家科学基金会（NSF）的资助下，开始联合建设 LIGO。LIGO 是位于美国华盛顿州汉福德和路易斯安



图 2-16 LIGO 外观图

那州利文斯顿的双胞胎观测站。为什么要设两个观测站？这是因为两个站之间的距离达到 3000km，如果两台观测仪都观测到了引力波，一方面可以更加确实，另一方面会有一个微小时差，通过时差，就能确定引力波来自何处。不过，一开始 LIGO 并没有什么作为，经过数次耗资不菲的改造，LIGO 总算带来了好消息。

LIGO 的工作原理就是迈克尔逊干涉仪，如图 2-17 所示。当然在实际工作过程中，LIGO 的光路中光线还需要来回反射很多次，这样有效光路变长很多倍，能提高检测的灵敏度（精度）。简单地说，假设有两名短跑运动员，他们在任何情况下的跑步速度都一样，那么，如果跑道因为引力波扰动，长度发生变化，他们从 LIGO 的两条腿上跑回来的时间就会发生些微的差异。根据差异，我们就知道，空间确实在震动。由于时间久远，空间漫长，波动微弱，LIGO 探测到引力波非常不易（后面会根据广义相对论再次说明其非凡的意义）。

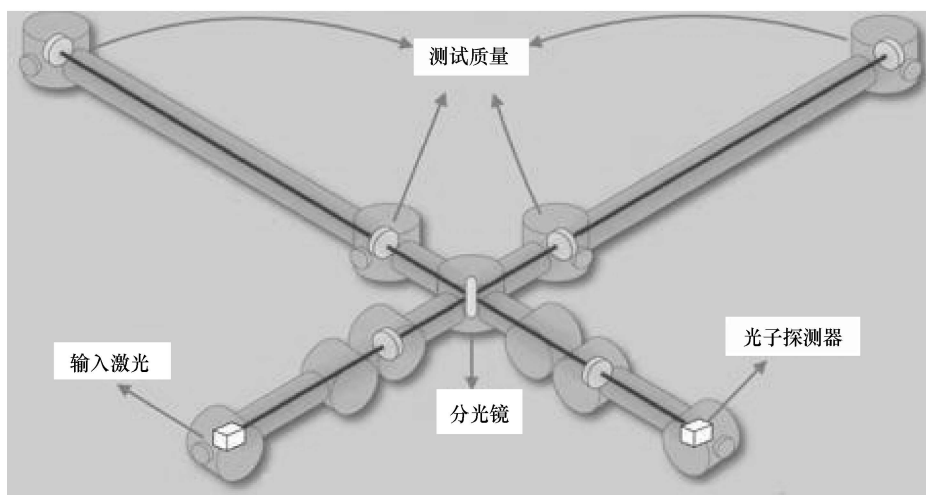


图 2-17 LIGO 工作原理图

在实际的 LIGO 引力波探测器中，激光迈克尔逊干涉仪的干涉臂的臂长达

到 4km，在多次反射后可以达到几千千米，这一干涉长度对引力波的中心频率为 100Hz 的信号最为敏感。引力波探测的精度是 10^{-21} ，相当于将地球到太阳的距离精确到原子半径的大小。LIGO 首次探测到的引力波就是 13 亿年前两个黑洞旋转合并时引起的时空涟漪，之后的两次探测结果都是双黑洞的合并事件。2017 年 10 月 16 日，LIGO 宣布探测到距离地球 1.3 亿光年的双中子星合并所产生的引力波，这是人类首次探测到双中子星合并事件。1.7s 之后，美国宇航局费米空间望远镜探测到此双中子星合并所产生的伽马暴，这是人类首次探测到引力波的电磁对应体。双中子星合并所产生的引力波被探测到，其意义在于从双中子星合并所产生的从 X 射线到微波的电磁信号中，找到了金、铂等新合成贵重元素的信号，从而揭开了困扰学界数十年的比铁重的元素及宇宙起源之谜。

短伽马暴的辐射被普遍认为发自于一个处于高度相对论性运动的喷流，因而辐射具有高度的方向性，只有当其以较小的概率指向地球时才能被看到。虽然引力波探测常常能够剑指天体核心，但天体最丰富的物理性质包括它们的环境性质仍然要通过电磁辐射表现出来。因此，只有实现了引力波和电磁波的双剑合璧，两者相互映照，才能为引力波源的天体性质提供交叉限制，并充分发挥引力波在天文学研究中的重要作用。其中，电磁对应体对于引力波而言，还具有定位功能，因为电磁波信号往往具有比引力波信号好得多的空间分辨率。持续时间小于 2s 的短时标伽马射线暴 (Short Gamma-Ray Burst)，被普遍认为可能起源于“中子星-中子星”或“中子星-黑洞”的合并。因此，此次 LIGO 探测到的与中子星合并相关的引力波事件，以及引力波和短伽马暴的成功观测，说明了天文学真正跨进了多信使研究（即电磁波、引力波、中微子、宇宙线等多种观测手段相结合的天文研究）的新时代，更将确凿无疑地解决短伽马暴起源这一几十年来悬而未决的天文难题。

三、狭义相对论的成就与困难

爱因斯坦在前人工作的基础上，分析了牛顿力学与电磁学之间的矛盾，在1905年发表的论文《论动体的电动力学》中坚持了为实践所证实的经典力学的相对性原理，抛弃了绝对时空观，也就抛弃了伽利略变换，提出了两个基本假设，创立了相对论，成为继牛顿、麦克斯韦之后最伟大的物理学家之一。

首先，爱因斯坦提出了两个基本假设。

(1) 相对性原理：所有物理规律（不仅是力学规律）相对于不同的惯性系都是一样的，不存在任何一个特殊的惯性系。

相对性原理是力学相对性原理的推广。它表明，在一个惯性系内做任何物理实验，都不能测出它是静止的还是作匀速直线运动，间接指出绝对静止的参考系是不存在的。

(2) 光速不变原理：光在真空中的传播速度相对于任何惯性系都是 c 。

最近有人做实验测得， π 介子相对于实验室的速度是 $0.99c$ 。 π 介子运动时要发光，按照经典的速度合成定理，实验室测得的光子的速度应为 $1.99c$ ，但实际测量结果仍为 c ，这就证实了光速不变原理。迈克尔逊实验也间接地证明了这一点。

之后，爱因斯坦得出了狭义相对论的时空观。

1. 同时的相对性

首先是时间的概念。爱因斯坦对牛顿的绝对时间概念提出了怀疑，并且经过10年的思考，终于得到异乎寻常的结论：时间的量度是相对的。

如图2-18所示，火车相对于地面的速度为 u 。取地面为 s 系，火车为 s' 系。在车厢中间放一闪光灯 M' 。假设某一时刻闪光灯突然闪了一下，在火车看来，由于 $M'A' = M'B'$ ，且光线左右传播的速度都是 c ，所以光线到达 A' 和 B' 是同

时的,即在火车看来,光线到达 A' 和到达 B' 这两件事是同时发生的。若在 A' 、 B' 两处放上已校对好的钟,则闪光到达 A' 、 B' 两处时两钟的读数一样。

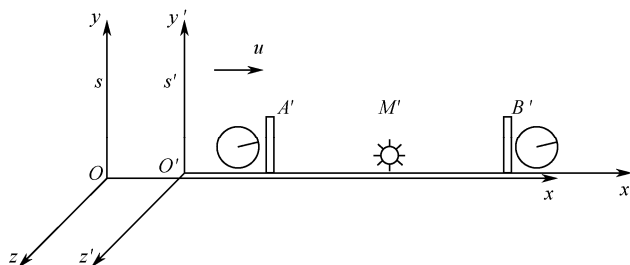


图 2-18 同时性的相对性

同样两件事,在地面看来怎么样呢?在地面看来,光在传播时,车也要运动。在光由 M' 到达 A' 、 B' 的过程中, A' 要迎着光走一段距离, B' 要背离光走一段距离。而相对地面光向左、右的速度应是相等的,因此,光必定先到达 A' ,后到达 B' 。即在地面看来,光线到达 A' 和到达 B' 这两件事是不同时发生的。

同样两件事,在一个惯性系内同时发生,而在另一个惯性系内却不同时发生,总是在前一惯性系运动后方的那个事件先发生,这就是同时的相对性。

2. 时间量度的相对性

如图 2-19 所示,在火车的顶部装上平面镜 N' , $M'N' = l_0$ 。 M' 闪光后,光线到达 N' ,然后又反射回 M' ,我们讨论 M' 发光和接收到光线这两件事。

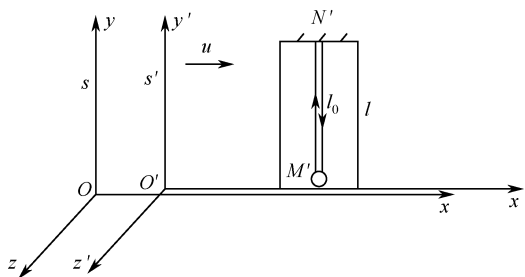


图 2-19 时间量度的相对性

在火车看来，这两件事的时间间隔为

$$\Delta t' = \frac{2l_0}{c} \quad (2-10)$$

在地面看来，这两件事仍要发生，但光线不再是直上直下，走的是一条斜线。设这两件事的时间间隔为 Δt ，则有

$$\left(c \frac{\Delta t}{2}\right)^2 - \left(u \frac{\Delta t}{2}\right)^2 = l_0^2 \quad (2-11)$$

$$\Delta t = \frac{2l_0}{c \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (2-12)$$

可以看出 $\Delta t \neq \Delta t'$ ，同样的两件事，相对于不同的惯性系，它们的时间间隔是不同的，这就是时间量度的相对性。

这两件事在 s' 系看来是发生在同一地点的。我们就把发生在同一地点的两件事的时间间隔称为固有时间，显然相对于观测者静止的钟显示的时间就是固有时间。在 s 系看来，这两件事发生在不同的地点，相应的时间间隔称为非固有时间，显然固有时间是最短的。

在火车上放一个钟，地面上并排放许多钟。当闪光发出时，把所有钟都校准，作为计时零点，即此刻 $t = t' = 0$ ，如图 2-20 中左图所示。当闪光回到 M' 时， s' 系的钟指向 t' ，地面上的钟指向 t 。显然 t' 是固有时间， t 是非固有时间，所以 $t > t'$ 。即当地面上的观察者看到地面上的钟指向 t 时，车上的钟指向

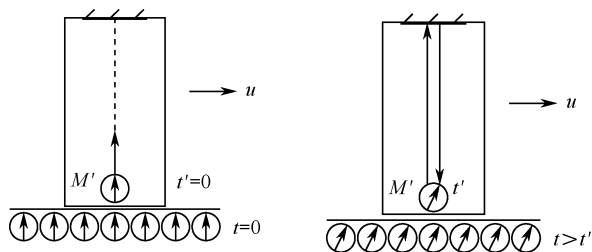


图 2-20 钟慢效应

t' ，因此他看到车上的钟变慢了，这个现象称为钟慢效应（或爱因斯坦延缓或时间膨胀效应）。注意，钟慢效应是指运动的钟变慢了。

一种称为 μ 子的粒子，是一种不稳定的粒子，在静止参考系中观察，它们平均经过 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ （固有时间）就衰变成电子和中微子。宇宙线在大气上层产生的 μ 子速度极大，速度 $v = 2.994 \times 10^8 \text{ m/s} = 0.998c$ 。如果没有钟慢效应，它们从产生到衰变的一段时间内平均走过的距离只有 $(2.994 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (2 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 600 \text{ m}$ ，这样， μ 子就不可能达到地面的实验室。但实际上 μ 子可穿透大气 9000 多米。原因是以地面为参考系， μ 子的“运动寿命”为

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - (0.998)^2}} = 3.17 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (2-13)$$

按此计算， μ 子通过的距离为

$$(2.994 \times 10^8) \times (3.17 \times 10^{-5}) \approx 9500 \text{ m} \quad (2-14)$$

这个结果与实验结果基本一致。

钟慢效应被普遍地作为科幻或神话小说的题材，如《西游记》中“天上一天，地下一年”的说法就是时间量度相对性的朴素观点。

3. 长度测量的相对性

仍选地面为 s 系，火车为 s' 系，现测量车的长度，如图 2-21 所示。设车的静止长度为 l_0 。在地面看来，车沿 x 轴运动，某一时刻车头 B 经过地面上的 P 点，经过时间 Δt 后，车尾 A 经过 P 点，即在地面看来， B 、 P 重合和 A 、 P 重合这两件事的时间间隔为 Δt 。相对于 s' 系，这两件事发生在同一地点，因此 Δt 是固有时间。地面上测得车长为

$$l = u\Delta t \quad (2-15)$$

在火车系（ s' 系）看来，车并没有运动，地面反而在后退。同样的两件事 B 、

P 重合和 A 、 P 重合发生在不同的地点，时间间隔 $\Delta t'$ 是非固有时间，则

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (2-16)$$

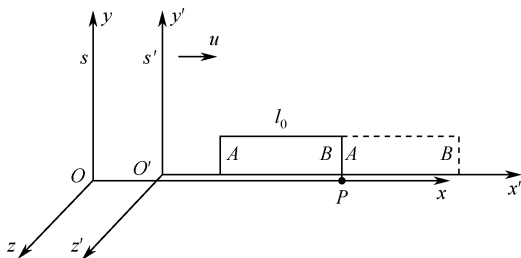


图 2-21 长度测量的相对性

火车上测得车长为 $l_0 = u\Delta t'$ ，故有

$$\frac{l_0}{u} = \frac{\frac{l}{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (2-17)$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (2-18)$$

式中， l_0 为车厢的静止长度，在相对静止参照系中测的长度称为固有长度。 l 是运动的车厢的长度，为非固有长度。因此，固有长度是最长的，或者说，运动的长度要缩短，这个结论称为尺缩效应（或洛伦兹收缩）。

前面讲过， μ 子以 $v = 0.998c$ 的速度垂直入射到大气层上，它衰变前通过的大气层厚度 l_0 为 9500m，从 μ 子本身的参考系看来，这层大气有多厚呢？因为对 μ 子来说，大气层是以速度 v 运动的，所以它的厚度为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 9500 \sqrt{1 - (0.998)^2} = 600\text{m} \quad (2-19)$$

这正是我们预期的结果，即尺缩效应。

需要说明的是，尺缩效应只发生在物体运动的方向上，与运动方向垂直的长度是不变的。

爱因斯坦认为，自己的最大突破是认识到了光速是绝对的，承认“光速不变原理”就必须承认“同时性的相对性”，这个难题困扰爱因斯坦很长时间，大约一年，想通了这一点，所有问题迎刃而解。

也应指出，庞加莱（如图 2-22 所示）在 1897 年发表的一篇文章《空间的相对性》（*The Relativity of Space*），以及后面的哲学著作《科学与假设》《论电子动力学》等中都提到了这一观点。

另外，洛伦兹（如图 2-23 所示）为麦克斯韦方程组追加了一个洛伦兹力方程，提出了洛伦兹变换。



图 2-22 庞加莱



图 2-23 洛伦兹

他们都十分接近相对论的发现，但没有认识到“光速不变原理”，根本没想到“同时”概念的相对性，从而与相对论失之交臂。

狭义相对论不仅完美解释了迈克尔逊-莫雷实验的结果，也将物理学理论提到了一个新高度，之后动力学得出的质能关系 $E = mc^2$ 更被认为是最有价值的贡献。

当全世界都在为狭义相对论的成就而欢欣鼓舞时，爱因斯坦本人却冷静地看到了自己理论的缺陷。首先，作为相对论基础的惯性系无法定义。牛顿认为存在绝对空间，所有相对于绝对空间静止或匀速直线运动的参考系都是惯性系，但相对论认为不存在绝对空间。有人建议，把惯性系定义为不受力的物体在其中保持静止或匀速直线运动状态的参考系，但这里存在矛盾，一是什么叫不受力呢？各种力场的存在让受力不受力无法定义。二是惯性系需要不受力，定义不受力需要惯性系，这在逻辑上是不能接受的循环。

爱因斯坦注意到的第二个缺陷是万有引力定律纳不进相对论框架。有几年爱因斯坦致力于把万有引力定律纳进相对论框架，几经失败后，他终于认识到，相对论容纳不了万有引力定律。

四、广义相对性原理与马赫原理

爱因斯坦反复思考狭义相对论遇到的两个困难，一是惯性系无法定义，二是万有引力纳不进相对论框架。他想，既然惯性系无法定义，不如抛开惯性系，把自己的理论建立在“任意参考系（包括非惯性系）”的基础上，把原来的相对性原理“物理规律在一切惯性系中都相同”推广为“物理规律在一切参考系中都相同”，我们称为广义相对性原理。

但新的问题出现了，即认为所有的惯性系都是平权的。若进一步追究，惯性系和非惯性系是否平权？非惯性系中有惯性力的存在，如何处理惯性力呢？

这正是马赫当年提出的问题。不解决这个问题，就不能摆脱牛顿的“绝对时空”。为此，我们先对这段历史进行简单的回顾。

牛顿力学是讨论物体的运动状态及其改变的，其描述脱离不开参考系。牛顿定律并不适用于所有的参考系，后人把牛顿定律适用的参考系称为惯性系。然而，牛顿力学的理论框架本身并不能明确给出什么是惯性参考系？牛

顿完全了解自己理论中存在的这一薄弱环节，他的解决办法是引入一个客观标准——绝对空间，用于判定各物体是处于静止、匀速运动，还是加速运动状态。

牛顿提出了区分特定物体的绝对运动（即相对于绝对空间的运动）和相对运动的判据。例如，用绳子将两个物体拴在一起，让它们保持在一定距离上，绕共同的质心旋转，从绳子的张力可以知道绝对运动角速度的大小。

“水桶实验”是牛顿提出的另一个更著名的实验，如图 2-24 所示。实验大意如下：一个盛水的桶悬挂在一条扭得很紧的绳子上，然后放手，于是有了下面的结果。

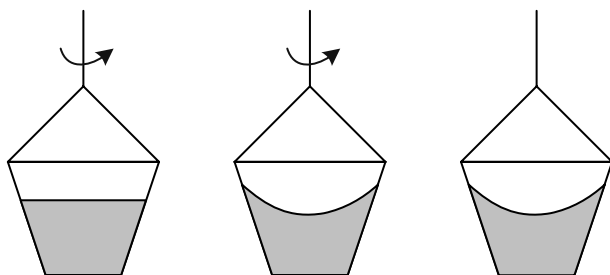


图 2-24 牛顿的“水桶实验”

（1）开始时，桶旋转得很快，但水几乎静止不动。在黏滞力经过足够的时间使它旋转起来之前，水面是平的，完全与水桶转动前一样。

（2）水和桶一起旋转，水面变成凹状的抛物面。

（3）突然使桶停止旋转，但桶内的水还在转动，水面仍然保持凹状的抛物面。

牛顿分析，在（1）（3）阶段，水和桶都有相对运动，而前者水面是平的，后者水面凹下；在（2）（3）阶段，无论水和桶有无相对运动，水面都是凹下的。牛顿由此得出结论：桶和水的相对运动不是水面凹下的原因，这个现象的根本原因是水在空间中绝对运动（即相对于牛顿的绝对空间的运动）的加

速度。

牛顿本人说过：“绝对空间，就其本性而言，与外界事物无关，永远是相同的和不动的。绝对的、真正的和数学的时间自己流逝着，并由于它的本性而均匀地与外界对象无关地流逝着。”那么绝对空间在哪里？牛顿曾经设想，在恒星所在的遥远的地方，或许在它们之外更遥远的地方。他提出假设，宇宙的中心是不动的，这就是他所想象的绝对空间。从今天的观点来看，牛顿的绝对时空观是不对的。不过，牛顿当时清楚地意识到，要给惯性原理一个确切的含义，就必须把空间作为独立于物体惯性之外的原因引进来。爱因斯坦说：“对此，牛顿自己和他同时代最有批判眼光的人都是感到不安的；但是人们要给力学以清晰的含义，在当时却没有别的办法。”爱因斯坦还认为，牛顿引入绝对空间，对于建立他的力学体系是必要的，是在那个时代“一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一道路”。

牛顿的绝对空间概念曾受到同时代人惠更斯、莱布尼茨等的非难和诘问，但由于牛顿力学的巨大成就，200余年中一直为人们普遍接受。对牛顿的绝对空间提出批判并且产生巨大影响的是奥地利物理学家马赫（如图 2-25 所示）。马赫认为，牛顿水桶实验中水面凹下，是它与宇宙远处存在的大量物质之间



图 2-25 物理学家马赫

有相对转动密切相关的。当水的相对转动停止时，水面就变成平的了。反过来，如果水不动而周围的大量物质相对于它转动，则水面也同样会凹下。如果设想把桶壁的厚度增大到几千米甚至几十千米，没有人有资格说出，这实验将会变成怎样。而他本人相信，这一怪桶的旋转将真的对桶内的水产生一个等效的惯性离心力作用，即使其中的水并无公认意义下的转动。马赫的思想归结为一切

运动都是相对于某种物质实体而言的，是相对于远方恒星（或者说是宇宙中全部物质的分布）的加速度引起了惯性力和有关效应。

在马赫看来，物体的运动都不是相对于绝对空间的，而是相对于别的物体而言的，相对于绝对空间的绝对运动是不存在的。离开物体之间的相互关系，说物体的运动是毫无意义的。马赫不但批判牛顿的绝对时空观，也对牛顿的“水桶旋转实验”的结论给予了批评。马赫说：“牛顿用转动的水桶所做的实验，只是告诉我们水对桶壁的相对转动并不引起显著的离心力，而这离心力是由水对地球的质量和和其他天体的相对转动所产生的。如果桶壁愈来愈厚，最后达到好几千米厚时，那就没有人能说这实验会得出什么样的结果……”

马赫还认为，所有一切都是相对的，所有的质量，所有的速度，所有的力都是相对的。所以他认为牛顿转动的水桶是相对于其他天体的相对运动，水面沿桶壁的升高是离心力作用的结果，也可以视为相对惯性力的作用，而这个惯性力是无数遥远天体对水面的引力作用，所以惯性力本质上就是引力。

我们不妨设想，在北极挂一个傅科摆。天空阴霾不见日月，人们默默地观察着摆面的进动，苦思着产生这一现象的根源。忽然间云迷雾散，豁然开朗，满天星斗历历在目。人们惊奇地发现，摆面的进动是与斗转星移同步的。如果你忘记了，或根本不知道，脚下的地球在朝相反的方向自转，你很可能怀疑，是否摆面是被远方的星星拽着一起旋转的。如果承认自己脚下的地球在自转，而傅科摆的摆面由于惯性而不动，你很自然地就把远方的恒星当成惯性参考系了。除了有形的物质，要在冥冥之中设想出一个绝对的惯性参考系来，不是有点太神秘了吗？

马赫认为，不存在以太和绝对空间，一切运动都是相对的。这一思想引导了爱因斯坦的狭义相对论创立。

马赫还认为惯性效应起源于物质间相对加速产生的相互作用，这一思想又导致爱因斯坦猜测惯性力可能与万有引力有相同或相似的根源，都起源于物质间的相互作用，从而导致爱因斯坦走上广义相对论的正确道路。所以，马赫原理在历史上的贡献应该肯定。

五、引力质量与惯性质量

爱因斯坦注意到，惯性力与物体的惯性质量成正比，这个特点与万有引力非常相似，万有引力与物体的引力质量也成正比。

从牛顿力学来说，质量本身被赋予两种不同的意义。

一个从动力学方程式（牛顿第二定律）引入：

$$F = m_1 a \quad (2-20)$$

式中， m_1 表示惯性质量，代表着物体运动的惯性，即物体抵抗运动变化的程度。

另一个从牛顿万有引力定律出发：

$$F = G \frac{M m_g}{r^2} = m_g g \quad (2-21)$$

式中， m_g 是表示物体引力大小的一个参数，称为引力质量。由于

$$m_1 a = m_g g \quad (2-22)$$

而自由下落的加速度是一个常量，所以

$$m_1 = m_g \quad (2-23)$$

马赫的深邃思想一时不为人们所理解，却给了爱因斯坦极大的启发，惯性力与物体的惯性质量成正比，这与万有引力与引力质量成正比非常相似。通过自由落体和单摆的实验结果，在当时的精度下，引力质量和惯性质量都精确相等。爱因斯坦意识到，惯性问题和引力问题可以合在一起解决，狭义相对论的两个困难实际上是一个困难，这引导他于 1915 年创立了广义相对论。在此之前的 1913 年 6 月 25 日，爱因斯坦写信给马赫：“明年日食时将会证明，

以参考系的加速度同引力场等效为基础的基本假设是否真正站得住。果真如此，则您对力学基础所做的贴切研究，将不顾普朗克不公正的批评而得到光辉的证实。因为完全按照您对牛顿水桶实验的批判，一个必然的后果是惯性来源于物体的一种相互作用。这里的第一个推论写在我文章的第 6 页上，再补充两点：（1）如果加速一个很重的物质壳层，则包含在此壳层中的质量会受到一个加速的力。（2）如果相对于恒星围绕中心轴旋转此壳层，壳内将产生一个科里奥利力，也就是说，傅科摆的摆面将被曳引（实际上曳引的角速度小得无法测量）。”

马赫的思想对广义相对论的建立影响巨大，爱因斯坦于 1918 年前后使用了马赫原理的说法，以表达下列命题：时空的局部结构（从而试探质点的惯性行为）仅由质量和能量的分布所决定。爱因斯坦认为，马赫原理应能在广义相对论中得到体现。他设想，影响惯性的那种物质间相互作用应是引力，但不是牛顿的 $1/r^2$ 引力。与电磁相互作用类比，牛顿的引力相当于库仑的静电力；此处要求的是一种正比于 $1/r$ 的“辐射力”，这应在广义相对论中得到印证。1918—1921 年间仑斯和锡林根据广义相对论导出了一个旋转球壳产生曳引作用的公式，曳引的角速度为

$$\omega_{\text{曳}} = k \frac{G}{c^2} \frac{m_{\text{壳}}}{R_{\text{壳}}} \omega_{\text{壳}} \quad (2-24)$$

式中， $m_{\text{壳}}$ 、 $R_{\text{壳}}$ 、 $\omega_{\text{壳}}$ 分别为球壳的质量、半径、角速度， $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 为引力常量， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速， k 为无量纲的因子，它与摆相对于球壳的位置有关，其值为

$$k = \begin{cases} 4/3 & \text{球壳内任何地方，或南北极} \\ -2/3 & \text{球壳外赤道处} \end{cases} \quad (2-25)$$

以上结果证实了爱因斯坦的想法。

爱因斯坦把相对性原理称为狭义相对性原理，并把它推广到一切惯性系和非惯性系：所有参考系都是平权的，物理定律必须具有适用于任何参考系

的性质，这条原理称为广义相对性原理。

要把相对性原理和相对论推广到非惯性系，我们先来看看非惯性系中的时空有什么特点。

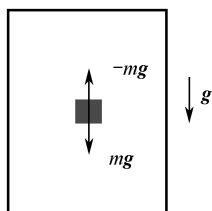
相对于惯性系 s 转动的参考系是个典型的非惯性系 s' 。假定在 s 系中有一半径为 r 的圆环，让圆环围绕其圆心匀速转动，则由狭义相对论的结果可知，该圆环的周长将缩短，但半径不变，这意味着该圆面将发生弯曲。

圆的周长 $s = 2\pi r$ 是欧几里得平面几何学中的公式。在欧几里得平面几何中还有许多我们很熟悉的公理或定理，如两条平行线永不相交、三角形内角和等于 180° 等。我们生活在地球的表面，在大范围内，欧几里得平面几何学就不适用了。例如，在局部看来是平行的两根南北方向的子午线，到了北极就会相交；三角形的内角和是大于 180° 的；北极圈的周长小于半径的 2π 倍等（不熟悉球面几何的读者，找一个地球仪来观察一下就会明白）。所以，上面揭示的非惯性系的性质，正是时空弯曲的表现。

六、等效原理和局部惯性系

在自然界中寻找严格的惯性系是不容易的，因为不受力的物体才能作为惯性系，而这样的物体是不存在的，所以沿着这个思路是永远也不可能找到惯性系的。爱因斯坦却从另外一个角度悟出了真谛。

若物体 m 在引力场中自由下落，则它受到引力 mg 作用。利用牛顿第二定律，有 $mg = ma$ ，所以 $a = g$ ，即不论物体的质量和



材料的性质如何，它在引力场中的加速度始终等于引力场强度，这是引力场特有的性质。

如图 2-26 所示，假定有一自由降落的升降机，其内有一物体，则它们有共同的加速度 $a = g$ ，物体

图 2-26 自由降落的升降机 相对于升降机的加速度为零。若给物体一速度的话，

则物体相对于升降机作严格的匀速直线运动。也就是说，在物体看来，升降机是一个严格的惯性系。若以升降机为参考系，物体受到的引力 mg 和惯性力 $-mg$ ，大小精确相等，方向相反，所受合力为零，因此牛顿定律严格成立。

若有一人站在相对地面静止的笼中，他会受到一个向下的重力 mg ，使他束缚在底板上。若去掉地球，让笼子以加速度 g 向上运动，则人同样会感受到一个向下的力 mg （惯性力），使他束缚在底板上。这个人是区分不清这两个力的，所以重力与笼子由加速度产生的惯性力是等价的。

综上所述，物体所受的引力和加速度产生的惯性力是等价的，这一结论称为等效原理。

从牛顿力学的观点看，地面参考系是惯性系，自由降落的升降机则不是。但我们也可以认为，自由降落的升降机是惯性系，地面参考系内感觉到的重力是它相对于惯性系有向上加速度的效果。在升降机内是观察不到引力的存在的，但是这里的升降机不能太大，因为太大时，升降机内各点引力场将不再均匀（下文将详细介绍），也就不能再作为惯性系，所以这里的惯性系应是小范围的，称为局部惯性系。

将爱因斯坦的理论向前推进：惯性场与引力场局域等效，即在无穷小时空范围内，人们无法区分引力与惯性力，即为等效原理。

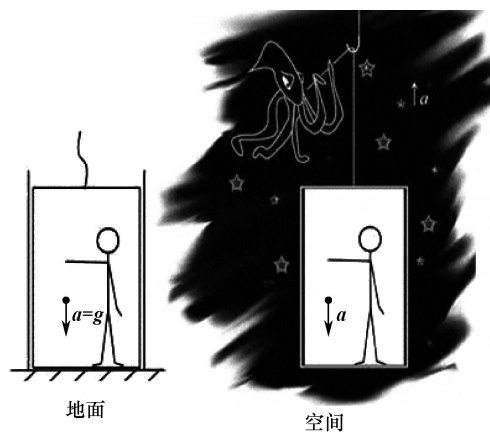
爱因斯坦的电梯思想实验清楚地表达了他的等效原理思想。设想观测者在封闭电梯内得不到任何外界消息，看到物体自由下落，下落加速度 a 与物质组成无关，如图 2-27(a)所示，他无法判断自己属于下列两种情况中的哪一种：

- 电梯静止在一个引力场强为 a 的星球表面（比如说地球表面）；
- 电梯在无引力场的外太空以加速度 a 运动。

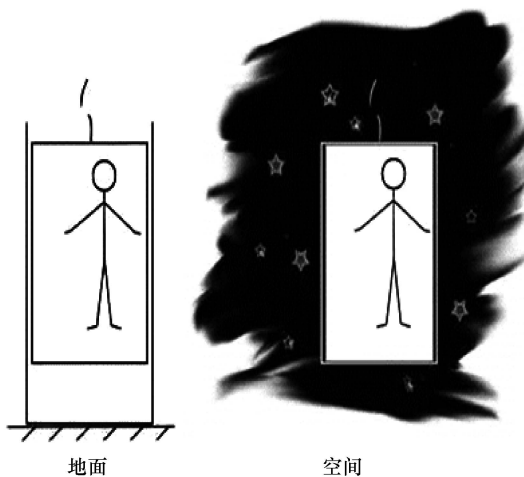
当观测者感到自己和电梯内一切物体都处于失重状态时，如图 2-27(b)所示，他同样无法判断自己属于下列两种情况中的哪一种：

- 电梯在引力场中自由下落；

- 电梯在无引力场的外太空中作惯性运动。



(a) 表示引力与加速 (左边电梯静止在一个引力场强为 a 的星球表面, 右边表示电梯在无引力场的外太空以加速度 a 运动)



(b) 自由下落与失重 (左边表示电梯在引力场中自由下落, 右边表示电梯在无引力场的外太空中作惯性运动)

图 2-27 爱因斯坦思想电梯实验

等效原理导致无法用任何物理实验区分引力场和惯性场。

然而, 惯性场和引力场不同, 它们在有限大小的时空范围内并不等效。

例如，由于星球是球体，静置于星球表面的飞船，其内部的引力线有向星球中心汇聚的趋势，引力分布是不均匀的，即有引力梯度；而在星际空间加速的飞船，其内部的惯性力线则是平行的。只要电梯不是无穷小，探测这些力线的灵敏仪器就可以区分这两种情况。引力不能被惯性离心力完全抵消，对飞船内的物体将会产生引力差，对物体产生撕扯效果，也就是潮汐力（Tidal Force），所以等效原理就是一个局域性的原理，也就是说，引力场和惯性场仅在无穷小的时空范围内不可区分，如图 2-28 所示。

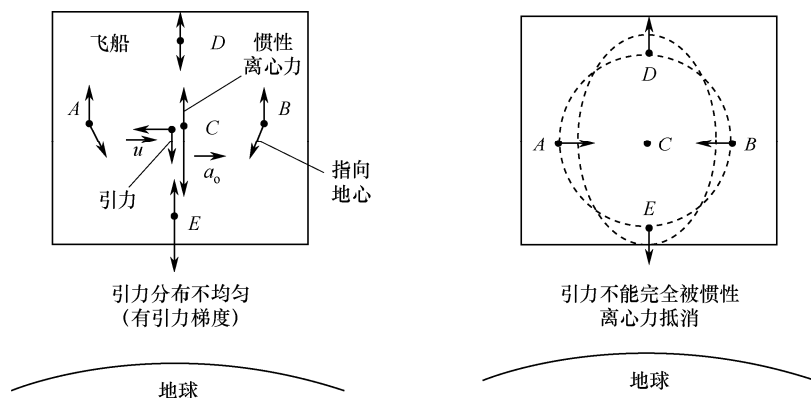


图 2-28 惯性场与引力场的差别（左图表示引力方向与惯性离心力差别，右图表示引力不均匀产生的效应）

下面我们根据等效原理推论出引力场中的一些特殊效应。

考虑一艘在星球引力场中自由降落的宇宙飞船。设想它从很远的地方 O' （在那里星球引力几乎不存在）开始自由降落，如图 2-29(a)所示。经一定时间它到达距球心为 r 的地方 P' ，如图 2-29(b)所示。此飞船是个局部惯性系，称为 s 系。对于星球的参考系，可以有两种彼此等效的看法：（1）星球参考系是个相对于惯性系 s 向上作加速运动的非惯性系 s' ，所谓“引力”不过是其中惯性力的表现而已；（2）星球参考系是个有引力场的静止参考系。我们先采用观点（1）。

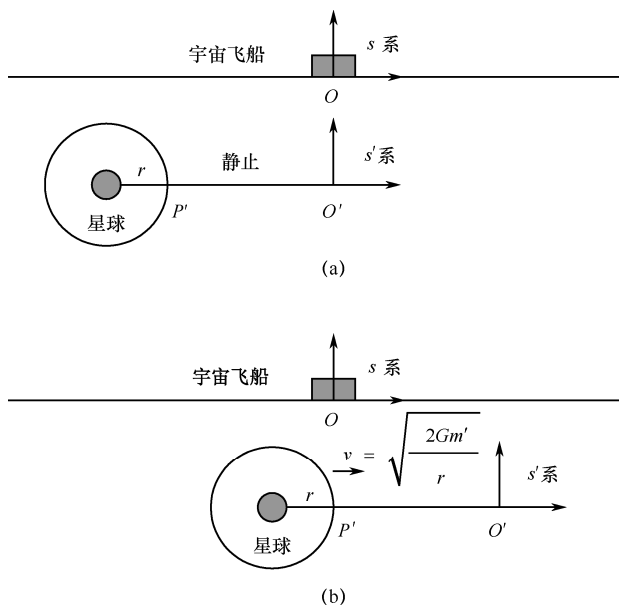


图 2-29 等效原理与引力的时空效应

当星球离宇宙飞船很远时，它对惯性系 s 没有相对运动，二者的时空间隔是一样的。当它加速地到达宇宙飞船附近时，它已具有相对速度 v ，从而自 s 系观测， s' 系中发生了爱因斯坦延缓和洛伦兹收缩，得

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2-26)$$

$$dr = \sqrt{1 - v^2/c^2} dr' \quad (2-27)$$

广义相对论是牛顿引力理论的推广，它认为后者只在弱引力场中成立，且在这种条件下广义相对论应趋于牛顿的引力理论。我们假定宇宙飞船行经的区域不超出弱引力场的范围，上式中的 v 可以用牛顿力学来计算。 s' 系相对于 s 系的速率也就是宇宙飞船从无穷远自由降落所获得的速率。后者可利用机械能守恒来计算，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{Gm'm}{r} \quad (2-28)$$

式中， m 和 m' 分别为宇宙飞船和星球的质量，等号左边是飞船的动能，右边

的引力势能是以无穷远为零点的，由此可得

$$v^2/c^2 = 2Gm'/(c^2 r) \quad (2-29)$$

代入式 (2-26) 和式 (2-27)，得

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - 2Gm'/(c^2 r)}} \quad (2-30)$$

$$dr = \sqrt{1 - 2Gm'/(c^2 r)} dr' \quad (2-31)$$

现在我们切换到观点 (2)，即认为 s' 系是个有引力场的静止系。按照等效原理，上式中的 dt 、 dr 应理解为无穷远无引力地方的时空间隔，而 dt' 、 dr' 是引力场中的固有时空间隔。该式意味着，在引力场中发生的物理过程，在远处观测，其时间节奏比当地的固有时间慢，其空间距离比当地的固有长度短。把这两个效应综合起来，我们就会得到这样的结论：从远处观测，引力场中的光速变慢（这并不违反光速不变原理，因为光速不变原理只适用于惯性系）。

七、走向广义相对论

爱因斯坦回忆道：“有一天，突破口突然找到了。当时我正坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子里忽然闪现一个念头，如果一个人正在自由下落，他绝不会感觉到自己有重量。我吃了一惊，这个简单的思想实验给我的印象太深了，它把我引向了引力理论。”

等效原理进一步告诉我们：只有引力场和惯性场存在时，任何质点，不论质量大小，在时空中都会描绘出同样的曲线。自由落体实验已表明了这一点。再如，在真空中斜抛金球、铁球、木球，只要抛射的初速和倾角相同，三个球在空间描绘相同的轨迹。即质点在纯引力和惯性力作用下的运动，与质量、成分无关。

爱因斯坦大胆猜测，引力效应可能是一种几何效应，万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。因为引力起源于质量，时空弯曲起源于物质的

存在和运动。

把时空几何与运动物质联系，需要数学知识，爱因斯坦受到闵科夫斯基四维时空和张量的影响，又详细学习了黎曼几何，为创立广义相对论做好了数学准备。

下面，利用数学知识，我们来寻找时空几何与运动物质间的联系。

1854 年，德国数学家、物理学家黎曼在格丁根大学发表的题为“论作为

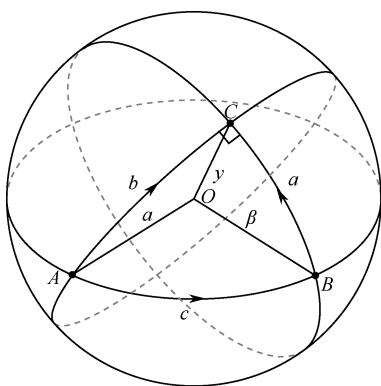


图 2-30 球面上的短程线

几何学基础的假设”的演说，创立了黎曼几何学。黎曼将曲面本身看成一个独立的几何实体，而不是把它仅仅看成欧几里得空间中的一个几何实体。黎曼几何认为，球面上没有直线，只有短程线，即“大圆周”。过球面上两点（如图 2-30 中的 A 点和 B 点）和球心（ O 点），作一个平面，此平面在球面上截出的曲线就是“大圆周”，地球上的赤道和经线都是“大圆周”。

短程线也称测地线。所谓测地线，是指在弯曲的时空中，如果一个物体不受任何外力作用（引力除外），那么它的轨迹就是一条测地线。测地线是时间流逝最慢的那条线，是空间短程线的推广，是连接两地之间最短的线；时空中的测地线不是短程线，是时间最长的那条线。在黎曼空间，就是有曲率的空间中，它也被称为“直线”，就是两点之间距离最短的连线。比如地面上一条从 A 地到 B 地的笔直公路，把地球表面看成一个二维黎曼空间，这条公路就是短程线，是“直线”。而把它映射到三维欧几里得空间里看，却是条包络在地球表面的弧线。

如果是平面地图，北京飞往纽约的最短行程确实是向东直穿太平洋后到达纽约，但事实上地球并不是一个平面而是一个球体。简单来说，如果在地球

球仪上连接北京和纽约，那么最短距离（10980km）就变成了一条跨越北极的弧线（大圆）。飞机向东北方向飞，经过我国东北，俄罗斯远东地区，飞到白令海峡附近，然后沿阿拉斯加的北海岸向东，再转向东南，穿越加拿大的大片地区，最后飞抵纽约。这条航线就是北京、纽约、地心三点作出的平面截得地球表面的短程线。

黎曼天才地预言到，真实的空间不一定是平直的，如果不平直，就不能用欧氏几何来描述，必须用黎曼几何来描述。他还预见，物质的存在可能造成空间的弯曲。爱因斯坦产生了与黎曼相同的想法，并与格罗斯曼合作，寻找联系物质和时空几何的基本方程——场方程。到德国后，他与希尔伯特讨论，几个月后，他给出了广义相对论的核心方程——场方程，建立起了广义相对论。

新理论克服了旧理论的两个基本困难，用广义相对性原理代替了狭义相对性原理，并且包容了万有引力。爱因斯坦认为这是在原有理论上的推广，故称为广义相对论。

1913 年，爱因斯坦和格罗斯曼合写了一篇论文，他们在论文中提出了这样的思想：我们认为引力只不过是时空弯曲这一事实的表现。然而，由于爱因斯坦的一个错误，他们未能找到将时空曲率和处于其中的质量和能量相联系的方程。最后，爱因斯坦在 1915 年找到了正确的方程。1915 年夏天，他在访问格丁根大学时，曾经和希尔伯特讨论过他的思想，希尔伯特甚至比爱因斯坦还早几天独立地找到了同一方程。尽管如此，正如希尔伯特本人承认的，新理论的功劳应归于爱因斯坦，把引力和时空弯曲联系起来正是爱因斯坦的思想。这个时期的德国是值得赞扬的，甚至在战时，科学讨论和交流仍然可以不受干扰地进行，这和 20 年后的德国纳粹时期相比，真是天壤之别。

至此，物理学史上最为优美而伟大的理论终于问世，下面，我们来总结一下期间发生的大事。

爱因斯坦于 1905 年开始研究万有引力，1907 年提出等效原理，1911 年得到光线在引力场中弯曲的结论，1913 年爱因斯坦与格罗斯曼一起把黎曼几



图 2-31 爱因斯坦 1912 年在
布拉格研究广义相对论

何引入引力研究，1915 年与希尔伯特讨论，之后得到场方程。对于这个伟大的发现，爱因斯坦从不掩饰自己的骄傲，他说：“狭义相对论如果我不发现，5 年内肯定会有人发现；广义相对论如果我不发现，50 年内也不会有人发现。”图 2-31 所示为爱因斯坦研究广义相对论时期的照片。

这里我们也必须提出并认可其他人的贡献：庞加莱和洛伦兹已经非常接近于狭义相对论了；马赫思想和马赫原理给予爱因斯坦极其重要的

启发；黎曼几何认为真实的空间不一定是平直的，闵科夫斯基给出四维空间，这是广义相对论的数学基础；爱因斯坦曾与格罗斯曼合作，一起寻找联系物质和时空几何的基本方程——场方程。

还需要提到的是希尔伯特（如图 2-32 所示），这是位伟大的有着宽阔胸怀的数学家，他也曾于 1915 年 11 月 20 日完成场方程并投稿，于 1916 年 3 月 1 日出版，但这个方程是错误的。而爱因斯坦于 1915 年 11 月 25 完成并投稿，于 12 月 5 日发表了正确的场方程。



图 2-32 德国数学家希尔伯特

希尔伯特曾在给爱因斯坦的信中提到“我们的理论”，爱因斯坦很不高兴，回信“这是我的理论，什么时候成了我们的理论”，希尔伯特承认爱因斯坦是相对论唯一的创建人，两人因此结下深厚的友谊。

八、广义相对论的场方程

广义相对论，实际上就是一个关于时间、空间和引力的理论。狭义相对论认为，时间、空间是一个整体（四维时空），能量、动量是一个整体（四维动量），但没有指出时间、空间与能量、动量之间的关系。广义相对论进一步指出能量、动量的存在（也就是物质的存在）会使四维时空发生弯曲，万有引力并不是真正的力，而是时空弯曲的表现，如图 2-33 所示。如果物质消失，时空就回到平直状态。

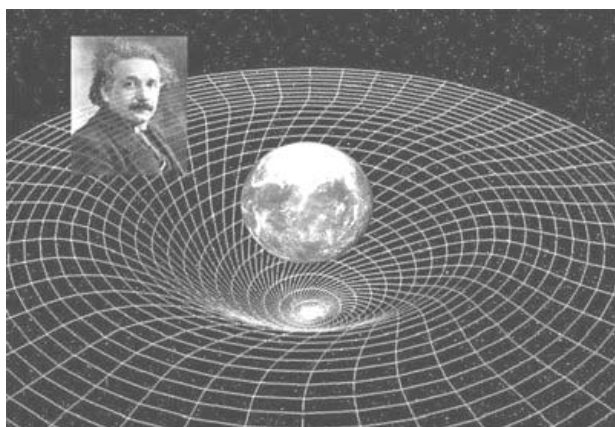


图 2-33 弯曲的时空

爱因斯坦给出了一个基本的场方程：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = kT_{\mu\nu} \quad (2-32)$$

式中， k 与万有引力常数 G 有关，其值为 $k = \frac{8\pi G}{c^4}$ ， c 为光速， $R_{\mu\nu}$ 、 $g_{\mu\nu}$ 、 R 、 $T_{\mu\nu}$ 为张量。

张量方程不在坐标系下变换，符合广义相对性物理规律不依赖于坐标系的选择。

方程实际上是由 10 个二阶非线性偏微分方程组成的方程组，非常难解。但可以精确地算出能量、动量的存在是如何影响时空弯曲的。该式左边是描述时空曲率的量，右边是描述能量、动量的量。该方程的物理意义很清晰：物质告诉时空如何弯曲。

相对论把四维时空中的曲线称为世界线。广义相对论认为：万有引力不是一般的力，而是时空弯曲造成的几何效应。质点在万有引力作用下的几何运动（如地球上的自由落体、行星的绕日运动等）没有受到力，而是时空弯曲中的自由运动——惯性运动。它们在时空中描述的世界线，虽然不是直线，却是直线在弯曲时空中的推广——测地线。粗略地说，测地线就是短程线，即两点之间的最短线或最长线（相对论中把最短线和最长线都称为短程线）。当时空恢复平直时，测地线就是通常的直线。

爱因斯坦采用数学方法得到测地线方程，作为决定弯曲时空中自由质点如何运动的“运动方程”，方程为

$$\frac{d^2 x^\alpha}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} = 0 \quad (2-33)$$

式中， s 为测地线的弧长， $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ 称为“联络”，描述引力场强或惯性场强。

后来爱因斯坦和苏联的福克分别证明，从场方程可以推出运动方程，所以广义相对论的基本方程只有一个，就是场方程。同时，场方程作为场源的质量，在推出的运动方程中，同时出现在惯性质量和引力质量两个位置上。这告诉我们，在广义相对论的理论框架中，引力质量和惯性质量是同一个东西。

九、如何理解时空弯曲

最简单的弯曲时空是一个弯曲空间加上弯曲时间，在弯曲时空中，空间只是沿着中心质量的径向方向弯曲。为了想象这个弯曲空间，我们用二维空

间打比方。将一个不弯曲的平面想象成一组无限多个同心圆，越向外同心圆的周长越大，周长与半径之比是一个常数，如图 2-34(a)所示。想象一下，如果这个常数小于 2π ，平面就变成了锥面，如图 2-34(b)所示。现在，我们将平面弯曲成这样：它还是由无限多个同心圆组成，但越向外，同心圆的周长与半径之比就不再是一个常数，而是与半径本身有关。即平面上的同心圆周长与半径之比是一个常数，锥面上以锥点为圆心的圆的周长与半径之比小于 2π ，但都是常数，如果圆的周长与半径之比不是常数而与半径有关，那就是一个弯曲面，如图 2-34(c)所示。

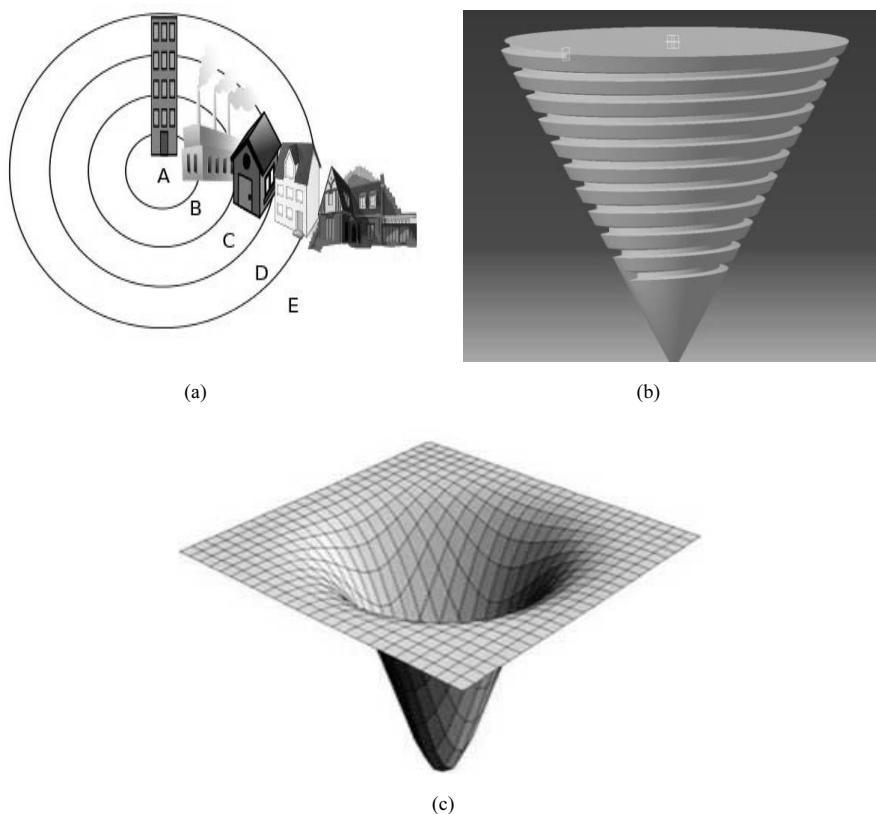


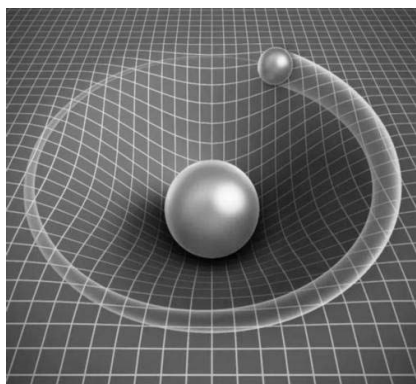
图 2-34 理解弯曲的空间

打个比方：4 个人拉紧床单 4 个角，床单这个二维空间是平的。放一个小玻璃球，它保持静止或匀速直线运动（假设床单表面足够光滑，床单表面的微小摩擦力可以忽略）。若在床单中央放一个铅球，床单中央会凹下去，二维空间变弯曲，再放小玻璃球，它就会滚向中央的大球。

将平面推广到三维，同心圆变成同心球，我们就得到了弯曲的空间。将上面打的比方中的铅球（大球）看成地球，小球就是下落的物体。

小球为什么会滚向中央的大球呢？按照牛顿的观点，这是因为大球“地球”用“万有引力”吸引了小球。按照爱因斯坦的观点，则是由于大球“地球”的存在使空间弯了，并不存在什么引力，小球滚向大球乃是弯曲时空中的自由惯性运动。

如果给小球一个横向速度，它会绕大球转起来。这时可以把大球看成



太阳，小球比作行星。为什么小球（行星）不远离大球（太阳）飞向远方呢？

按照牛顿的观点，这是因为小球受到大球的引力，不能跑向远方，只能环绕大球运动。按照爱因斯坦的观点，小球并未受到任何力，只是由于空间弯曲了，它在弯曲空间中作自由运动，因此不能

图 2-35 小球在弯曲空间中的自由运动 飞向远方，如图 2-35 所示。

再来说明弯曲的时间。这个比较容易想象，如果在图 2-35 的曲面上的每点放置一个标准时钟，那么在弯曲的空间中，越靠近中心的钟走得越慢。对于曲率无限大的地方，也就到了一个固定边界（即史瓦西视界，后面将会介绍），时钟走得无限慢，也就是说，如果我们站在外面看这个边界上的时钟，它的秒针几乎不动。

十、广义相对论的实验验证

爱因斯坦在 1995 年发表广义相对论时，求出了场方程的一些近似解，同时提出了检验广义相对论的三个实验：引力红移，行星轨道近日点的进动，光线偏折，这三个实验均被观测证实。之后的 1970 年雷达回波延缓实验和 1978 年发现的脉冲双星运转周期减少，也都间接证明了引力波的存在。2015 年底，LIGO 直接观测到双黑洞合并产生的引力波，更是填补了广义相对论实验验证的最后一块缺失的拼图。

1. 光线的引力偏转（光线偏折）

在星球的引力场中，时缓尺缩和光速减小的第一个推论，就是光线在经过星球表面附近时会发生偏转。就像当一张纸的某处被打湿后，由于局部发生膨胀和收缩，它要变皱一样，时缓尺缩效应则使星球附近的“四维”时空变弯。平直的时空中最短的路线是直线，弯曲的时空中没有直线，最短的路线称为“测地线”或“短程线”，光线将按短程线行进。从远处（那里时空是平直的）看来，光线就在它附近发生了偏转。为了对此建立一个较为形象的物理图像，我们用二维的曲面来比喻。如图 2-36 所示，有了星球后，空间像弹性膜一样中央凹陷下去，图中 A 点是恒星的实际位置，B 点是恒星的表观位置，原来沿直线行进的光线就好像受到星球吸引似的，向星球方向偏转。

可见光在太阳附近会发生偏转，只能在日全食时观察到。天文学家首次观测是在 1919 年日全食的时候进行的，英国天文学家爱丁顿派出了两个科考队，分别奔赴非洲西岸普林西比和巴西进行观测，观测结果是前者偏转 1.61 角秒，后者偏转 1.98 角秒，比万有引力计算得到的 0.88 角秒都要大 1 倍左右。更可靠的数据是近年来射电天文学家利用脉冲星或射电源的测量提供的，最好的

结果取自于 1975 年对射电源 0116+08 的观测。此射电源每年 4 月中旬被太阳遮掩，射电天文学家利用这一有利情况，观测到无线电波偏转角是 1.761 ± 0.016 角秒，这和广义相对论的理论计算值 1.75 角秒符合得相当好。

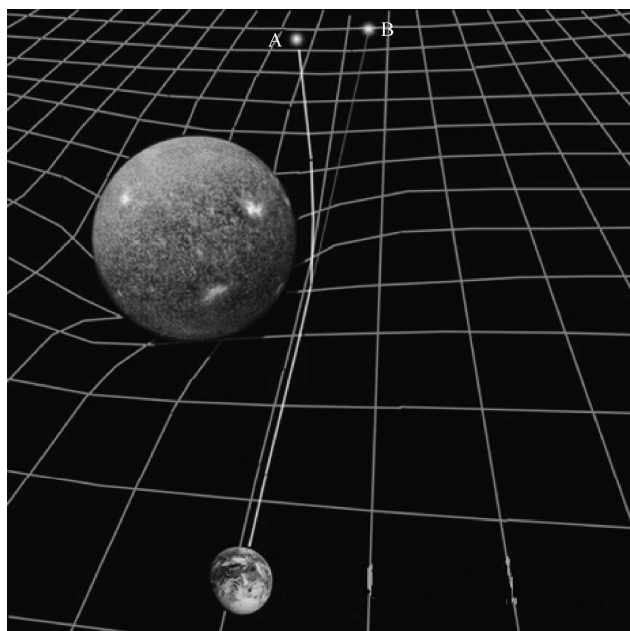


图 2-36 光的引力偏转

光线在引力场中弯曲的一个必然推论是引力透镜成像问题。早在 1920 年爱丁顿就提出，引力场会聚成像可作为广义相对论的一种检验；1936 年，爱因斯坦提出，引力透镜是散焦的，一般成双像；后来还有很多人对这个问题进行了进一步的讨论，但由于一直没有观测结果的支持，引力透镜的思想长期受到冷落。具有决定性意义的事件是 1979 年瓦尔什等人宣布发现一对孪生类星体“QSOs0957+561” A 和 B，它们之间的角距离只有 5.7 角秒，发射光谱和吸收光谱在很宽的波段内都一样，红移量也都约为 1.4。后经各方认证，多数天体物理学家认为这是引力透镜成双像的一个实例，自此以后我们又陆续

发现了其他一些多重像的例子。对黑洞位置的确定，更是利用了引力透镜成像。

2. 雷达回波延迟

引力场中时缓尺缩、光速减小的另一个可观测效应是雷达回波延迟。如图 2-37 所示，当地球 E 、太阳 S 和某行星 P 几乎排在一条直线上的时候，从 E 掠过 S 表面 R 点向 P 发射一束电磁波（雷达），然后经原路径反射回来。令 $\overline{ER} = a$ ， $\overline{RP} = b$ ，按照牛顿理论，雷达信号往返所需时间 $t = 2(a+b)/c$ 。广义相对论理论预言，雷达回波将延迟一定时间 Δt 。对于金星，理论计算的结果是 $\Delta t = 2.05 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。1971 年夏皮罗等人的测量结果对此的偏离不到 2%，这个测量是相当困难的，要达到 10^{-4} s 的精度，就要求距离的精度达到千米。金星表面山峦起伏，能做到以上的精确程度，

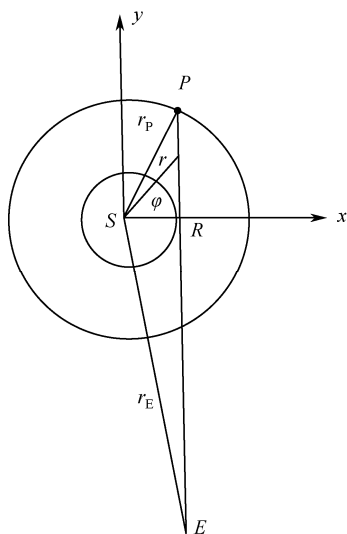


图 2-37 雷达回波延迟

应当说理论与实测已相当符合。这之后，利用固定在火星的水手号、海盗号等人造天体上的应答器代替反射的主动型实验，得到了更好的结果。

3. 引力红移

根据广义相对论，巨大引力场发出的光线会发生红移，称为“引力红移”。可观测到的引力红移的贡献来自两个方面：一是来自光源，由于光源所在位置处的引力场使得时间膨胀，发出的光波比没有引力场的光波波长更长；二是来自传播过程中，质量巨大的星体发射的光子离开光源后，受其周围引力场作用会产生谱线位置变化。

每种物质的谱线用固有时来衡量是确定的，从星球表面 $r = R$ 处的物质发出固有周期 $T_0 = T'$ 的光，我们从远处看，它的周期 T 变长，二者之间的关

系服从

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - 2Gm'/(c^2 R)}} \quad (2-34)$$

而频率 ν 、 ν_0 之间的关系服从

$$\nu = \sqrt{1 - 2Gm'/(c^2 R)} \nu_0 \quad (2-35)$$

这便是引力产生的“红移”效应，红移 z 定义为

$$z = \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\nu - \nu_0}{\nu} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2Gm'}{c^2 R}}} \approx -\frac{Gm'}{c^2 R} \quad (2-36)$$

对于太阳来说， $m' = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ， $R = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$ ，由此算得 $z = -2.12 \times 10^{-6}$ 。

可见，太阳的引力红移是非常小的，很容易被其他因素（如热运动）所淹没，测量起来很困难。白矮星的质量大，半径小，引力红移效应较强，但天文学不能确切掌握它们的质量 M 和半径 R 的数据，因而难以进行理论计算。由于存在这些困难，直到 20 世纪 60 年代，引力红移才得到比较确定的结果。1961 年，太阳光谱中的钠 589.6nm 谱线的引力红移被观测到，结果与理论偏离小于 5%；1971 年，太阳光谱中的钾 769.9nm 谱线的引力红移被观测到，结果与理论偏离小于 6%；1971 年，对天狼星 B 星（白矮星）的测量得到结果 $z = -(30 \pm 5) \times 10^{-5}$ ，与理论偏离小于 7%。

地面上的引力红移效应更为微弱，若比较高度差为 h 的两点，则频率的变化为

$$\nu(h) = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{2Gm'}{c^2 (R+h)}}} \quad (2-37)$$

$$z = \frac{1}{\nu} \frac{d\nu}{dh} = \frac{d \ln \nu}{dh} = \frac{d}{dh} \left[-\frac{1}{2} \left(1 - \frac{2Gm'}{c^2 (R+h)} \right) \right] \approx \frac{Gm'h}{c^2 R^2} = \frac{gh}{c^2} \quad (2-38)$$

由此可知，对于几十米的高度差 h ， z 只有 10^{-15} 的数量级。为了测出这样精细的效应，谱线本身的自然宽度、发光原子的热运动和反冲所引起的多

普勒频移都应比此效应更小。1958 年发现的穆斯堡尔效应提供了消除发光原子反冲的有效方法，导致次年庞德等人完成了第一个地面上的引力红移实验。他们把 ^{57}Co 放射性衰变发出的 14.4keV 的 γ 射线从 $h = 22.6\text{m}$ 的哈佛塔顶射向塔底，在塔底测量频率的增加（确切地说，他们做的是“引力蓝移”实验）。在此实验中算得 $z = 2.46 \times 10^{-15}$ ，测得的结果是 $z = (2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$ ，二者符合得相当好。

4. 水星近日点的进动

开普勒定律声称，行星的轨道是以太阳为焦点的椭圆。按牛顿力学推算，严格的平方反比律导致严格的椭圆，这是一条闭合的曲线，行星沿着它作严格的周期运动。实际的天文观测告诉我们，行星的轨道并不是严格闭合的，它们的近日点有进动，如图 2-38 所示。牛顿力学对此可以做出解释，例如，预言水星近日点应有每世纪 5557.62 角秒的进动，其中 90% 是由坐标系的岁差引起的，其余部分来自其他行星（主要是金星、地球和木星）的摄动。但是，水星进动的实际观测值是每世纪 5600.73 角秒，与理论计算值相比多了 43.11 角秒。自 20 世纪以来该问题就引起了天文学家的注意，但得不到令人满意的解释。前文曾讲到从笔尖上算出来海王星的法国天文学家勒维烈，试图用水星轨道之内还有颗新行星来解释水星的近日点移位，但怎么也找不到这颗行星的踪迹。1915 年，爱因斯坦创立了广义相对论，成功地预言了水星近日点的进动还应有每世纪 43.11 角秒的附加值，这是时空弯曲对平方反比律的修正引起的。由于此数值与观测结果十分接近，被视为广义相对论初期的重大验证之一。

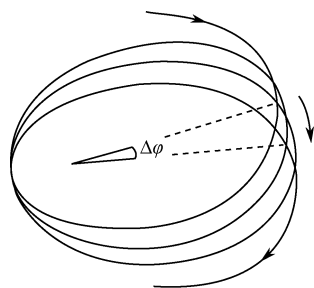


图 2-38 水星近日点的进动

十一、从广义相对论走向黑洞

广义相对论形式优美，概念奇特，无疑是理论物理中的上乘之作。但早年的经典验证都属于对牛顿力学数量级极小的修正，因而它在相当一段时间内受到冷落。只有在非用到它不可的领域内，广义相对论才大显神威，这个领域就是宇宙和黑洞。

广义相对论描述的是质量引起时空弯曲，如前文所述，恒星引起的时空弯曲如同床单上的铅球引起的下陷，更形象一些，可视为将铅球放在弹性材料制作的网格上，引起网格弯曲下陷，如图 2-39 所示。中等质量的恒星（如太阳）引起的网格下陷不深；而质量更大的恒星（如中子星）引起的网格下陷会较深，时空弯曲程度会更大；如果有恒星质量极大，引起时空的极大弯曲，弹性网格也撑不住而发生“破裂”成为一个“洞”，这时候任何进入洞口的东西都将掉入洞中，再也出不来，就形成了“黑洞”。

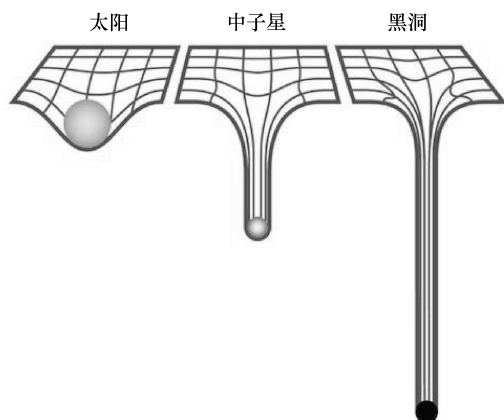


图 2-39 用网格下陷类比太阳、中子星和黑洞分别引起的时空弯曲

爱因斯坦 1915 年发表广义相对论时，自己并没有得到场方程的严格解，只用近似的方法解算出三大实验验证的结果。1916 年，德国数学家史瓦西求

出了广义相对论场方程第一个有意义的严格解，同时预言了黑洞的存在，得到了球对称黑洞的情景。

如果将大量物质集中于空间一点，其周围会产生奇异现象，即在质点的周围存在一个界面——视界，其半径为 $r = r_s \equiv 2Gm'/c^2$ ，一旦进入这个界面，即使是光也无法逃脱。后来美国物理学家惠勒将其命名为“黑洞”。黑洞的中心处有个奇点，使时间膨胀趋向无穷大，尺缩到零，光无限红移且凝滞不动，广义相对论与牛顿力学的差别被放大大到了极点。上式中定义的 r_s 称为史瓦西半径或引力半径。

史瓦西半径处的奇异性意味着什么？在物质密度特别大的地方，时空弯曲严重的地方，时钟就走得特别慢，如前文所述，越靠近黑洞的表面，放在那里的钟走得越慢。如果有一个钟摆在黑洞的表面，即视界处，远方的人看它，根本就不走，这就是广义相对论的时间延缓效应。

如图 2-40 所示，设想有个宇航员乘飞船从外部驶向引力中心，并在 $r > r_s$ 以外没有遇到天体的表面。在远离引力中心的观测者看来，当宇航员落向史瓦西半径 r_s 时，他所携带的钟走得越来越慢。在无限接近那里时，宇航员的钟停顿下来，他的时间凝固了，永远也到不了 $r = r_s$ 的地方。同时看到飞船越飞越慢，最后粘在黑洞表面上，进不去。由于时钟变慢后会出现红移，飞船越

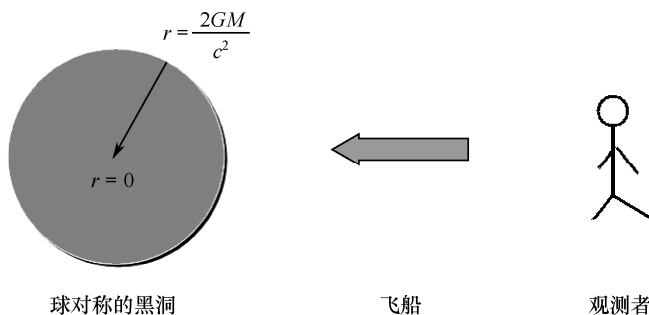


图 2-40 飞向黑洞的飞船

来越红，光红移量也越来越大，飞船越来越暗，直至趋于无穷而消失在那个地方的黑暗之中，但看不见它进去。

广义相对论利用场方程和闵科夫斯基的四维时空，用数学的方法得到黑洞之内和黑洞之外存在一个“负号”，导致时空坐标发生互换。在黑洞内部原来的时间坐标 t 会变成空间坐标，原来的空间坐标 r 则会变成时间坐标。洞内的等 r 面不再是空间的球面，而变成了等时面。时间是流逝的、有方向的。任何物质都必须顺着时间的方向前进，“与时俱进”。黑洞中的时间方向向里，向中心，所以进到黑洞中的物质不能停留，要一直缩到奇点上面去。因此，黑洞没有什么高密度的结构，它里面都是真空。

回过头来再来想想进入黑洞的冒险者，宇航员（如果他安然无恙的话）自己的感受完全就是另一回事。进去了！飞船上人用的钟，不是远方观测者用的那个钟，而是他自己携带的飞船上的钟，因此他觉得自己很顺利地进入黑洞了。

他看到飞船里的钟正常地走着，在预定的时间内穿过史瓦西半径所规定的边界，什么特别的感觉也没有。实际上只有一点，即当他越过此边界后就再也无法返回家乡，也无法再和家人通信，因为在那里有

$$v_{\text{逃}} = \sqrt{\frac{2Gm'}{r}} \geq \sqrt{\frac{2Gm'}{r_s}} = c \quad (r \leq r_s) \quad (2-39)$$

一旦逃逸速度超过了光速 c ，任何物体（包括光子，即电磁波）都逃不出去。进去以后，飞船不能停留，而会直奔奇点，因为黑洞中 r 变成了时间，时间的方向指向奇点，会不停向奇点方向流逝，所有进入黑洞的物质必须“与时俱进”地奔向奇点，不能停留。末日临近，奇点处的密度无穷大，当飞船非常接近奇点时，潮汐力就会把它撕碎。

在史瓦西半径以内，与外界断绝了一切物质和信息的交流。在它所规定的疆界内，任何物体，即使是最亮的星体，从宇宙的其他部分来看，也像消失了一样。只有一点，它的引力继续作用在史瓦西半径以外的物体上，或者

用广义相对论的说法，其内的物质继续引起外部的时空弯曲。所以，一个物体，若其质量全部分布在相应的史瓦西半径 r_s 之内，且能表现出上述特征的，就称为一个黑洞，由史瓦西半径所规定的界面，称为事件的视界，因为它里面的事件完全从外部观测者的视野中隐去了。在视界内部的物质将被引力挤压到一个奇点内，这里密度和时空曲率都无穷大，所以黑洞就是包在视界中的一个奇点。

第四节 黑洞的性质及观测方法

一、黑洞的性质

由于黑洞吸引一切，所以我们无法看到它的真面目。按照现行的物理理论，黑洞强大的引力场足以摧毁其内部的一切物质形态，扫去一切复杂的物质结构，刮去“毛发”，使结构变得简单，只剩下质量、电荷及角动量。惠勒将黑洞的这种特征称为“黑洞无毛”（也可以说只有 M 、 Q 、 J 三根毛），后来被人们称为“黑洞无毛定理”。

然而，黑洞并不是没有任何辐射。

牛津大学的彭若斯、美国物理学家米斯纳等人论证，处于转动的、带电的激发态黑洞存在超辐射和自发辐射，并且这类辐射可以带走黑洞的转动能、电磁能和电荷，导致黑洞转速减慢、电荷减少、能层变薄，直到蜕化为不转动、不带电的史瓦西黑洞。

1974 年，在提出原始黑洞的概念后，霍金应用量子场论的方法推证得出，一定质量的黑洞都有一定的温度，因而能发出热辐射，称为霍金辐射。

黑洞的热辐射与其质量有关。质量越大，温度越低，辐射越弱；质量越小，温度越高，辐射越强。有效的热辐射会使质量亏损。

$1M_{\odot}$ 的黑洞热辐射极弱，只有 10^{-6}K 的辐射温度，质量损耗也很小；而 10 亿吨的小黑洞，温度高达 10^{12}K ，具有明显的辐射效应和质量亏损。只有低于 10^{20} 吨（相当于月球重量，半径只有 0.1mm ）的小黑洞才能发生有效的蒸发。

小黑洞的蒸发过程起初很慢，随着质量的消耗会越来越快，最后发生强烈的爆炸，放出耀眼的光芒而消亡。

黑洞的寿命与其质量的立方成正比，质量越小，蒸发得越快，寿命就越

短。一个重量为 1 吨的黑洞会在 10^{-10} 秒内蒸发光，重量为 100 万吨的黑洞只能存在 10 年，初始重量为 10 亿吨（相当于一座山的重量，大小如同质子）的黑洞，寿命为 150 亿年；而一个 $1M_{\odot}$ 黑洞的寿命为 10^{66} 年！这个巨大的数字并不意外，因为黑洞的蒸发是通过“隧道效应”泄出辐射的量子效应，只发生在量子尺度上。

原始黑洞有如下特点：

- 具有较高温度，“放出”物质和辐射；
- 吸积效应小于发射效应，可以蒸发消失。

对质量足够大的黑洞来说，无论它们是在宇宙早期形成的还是后来在超新星爆发时产生的，只要其质量增大的速率超过了其自身蒸发的速率，就会一天天长大。粗略地估算，质量小于 10^{12}kg 的黑洞已经蒸发了，质量在 $10^{12}\sim 10^{23}\text{kg}$ 之间的黑洞现在正在蒸发，而质量在 10^{23}kg 以上的黑洞，包括由恒星演化形成的“第二代”黑洞，则正在吸积物质而不断长大。

苏联科学家亚历山大·特罗缅科等人于 1991 年提出了“微质量黑洞存在于一切空间”的假说，引起不少科学家的关注。他们认为，这类黑洞在地球上并不少见，有的给人类带来了许多麻烦和灾难。例如，美国夏威夷群岛的火山地幔中可能就隐藏着这类黑洞，成为岩浆翻滚的热源，它们发射的中微子也比太阳射向那里的更多（1000 倍），更容易被观测到。

二、黑洞的观测方法

既然黑洞是看不见的，如何证实它们的存在？只能靠间接的办法。目前观测黑洞的方法有 3 种。

1. 双星吸积

吸积是大质量天体通过其引力场的吸引从周围获取物质的过程。像太阳这样的普通恒星就在不断地从星际空间吸收物质，不过规模很小。拥有较强

引力场的天体，如中子星和黑洞，其吸积要强烈得多。中子星和黑洞的吸积是宇宙间最有效的产能方式。于是，向天体跌落的物质（多半来自双星系统中的邻近伴星）形成一个吸积盘。因为物质在引力场中降落时获得能量，盘中的原子又互相碰撞，所以原子的温度可以变得很高，以致能辐射 X 射线。在一些包含数百万个太阳质量的黑洞的星系中心以极大规模发生这类过程，有可能提供类星体的能源。即黑洞对周围恒星的吸积现象是可以被观测的。宇宙间的双星系统很多，如果黑洞能成为双星的一员，则它的伙伴发出的星风将把物质倾注在绕它周围的吸积盘上，如图 2-41 所示。

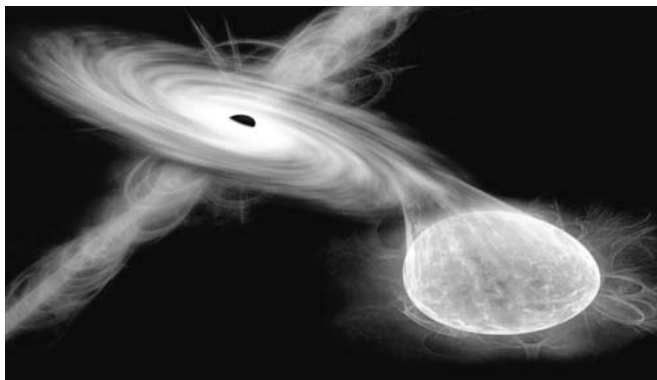


图 2-41 由一颗普通恒星和一个黑洞或中子星组成的双星系统吸积过程示意图

2. X 射线暴

双星吸积时，当堕落的气体盘旋地落向黑洞时，它们被加热到很高的温度，并发射大量的 X 射线。所以，在双星系统中黑洞往往看起来在“发射”X 射线（也有 γ 射线），形成 X (γ) 射线暴（如图 2-42 所示）。

3. 引力透镜

由于时空在大质量天体附近会发生畸变，因此光线在大质量天体附近会发生弯曲（光线沿弯曲空间的短程线传播）。如果在观测者到光源的视线上存在一个大质量的前景天体，则在光源的两侧会形成两个像，就好像有一面透

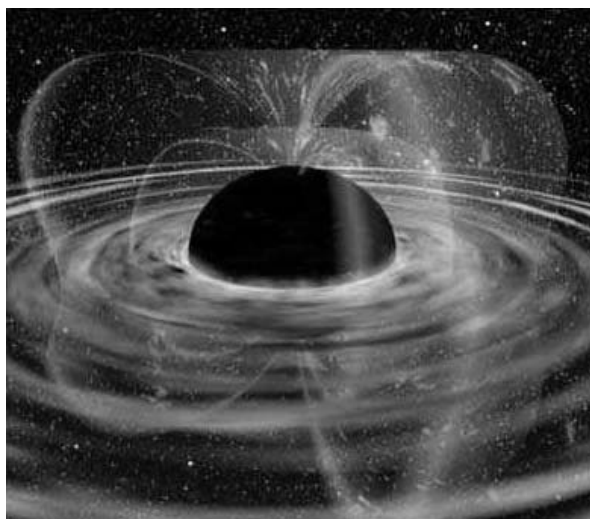


图 2-42 X 射线暴

镜放在观测者和天体之间一样，这种现象称为引力透镜效应，如图 2-43 所示。黑洞接近无限大的引力可以使某恒星的光线弯曲得很厉害，产生的引力透镜让我们看到恒星的全貌，即如果我们没有黑洞帮忙，该恒星背面是永远看不到的。

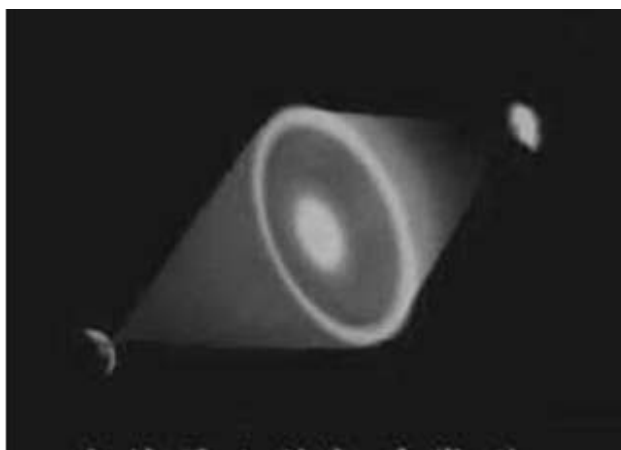


图 2-43 引力透镜

天鹅座 X-1 是最早被认为是黑洞的天体之一。它于 1965 年被发现，是个很强的 X 射线源。该黑洞从邻近轨道运行的蓝色超级巨恒星中吸取气体，它向内螺旋式释放着巨大热量，喷射出高能量 X 射线和 γ 射线。长久以来，天文学家们认为天鹅座 X-1 是最有希望的黑洞候选者，因为这个双星系统中可见星的质量约为 $20M_{\odot}$ ，而它的“发射”X 射线的不可见伴星的质量约为 $10M_{\odot}$ ，且宽度不到 300km，如图 2-44 所示。



图 2-44 天鹅座 X-1 号的双星系统

近年来，天文学家们提出的其他黑洞候选者还有：LMCX-3 中含有一颗质量约为 $10M_{\odot}$ 的黑洞；在麒麟座距地球约 3000 光年外，发现 X 射线源 A0620-00，其质量为 $3.2\sim 7M_{\odot}$ ，可能是已知离地球最近的候选者；1990 年发现一个较强的 X 射线和 γ 射线源，它距银河系中心不到 300 光年，暂时代号为 1E1740.7-2942；1994 年，哈勃太空望远镜拍摄到，在距离地球约 5000 万光年的椭圆星系 M87 中，一团宽约 1.6 亿千米的灼热气体形成的吸积盘正在环绕其中心旋转，每秒约 500km 的旋转速率表明，它可能有一个量级可达 $109M_{\odot}$ 的超大质量黑洞；2002 年，美国加州大学的科学家在《自然》上公布银心可能存在黑洞的消息，该黑洞的体积约为太阳的 260 万倍，直径约为地球轨道直径的 1/10，众多恒星围绕它旋转，构成巨大的圆盘，该黑洞是一个

强烈的射电和 X 射线源，定位在人马座 A (Sgr A) 处，称为人马座 A*，离地球约有 26000 光年的距离；此外，天蝎座 V861 的 X 射线伴星、圆规座 X-1 和 GX339-4 中都有黑洞的候选者。

三、黑洞的类型

1. 史瓦西黑洞

前文我们提到过，1916 年德国数学家史瓦西求出了广义相对论场方程第一个有意义的严格解，同时预言了黑洞的存在，得到球对称黑洞的情景。史瓦西黑洞又称基态黑洞，既不旋转也不带电，属于寻常黑洞。原星质量大于 $8 M_{\odot}$ 的恒星，其引力坍缩的最终结局会形成史瓦西黑洞。

2. 克尔黑洞

1961 年，新西兰物理学家克尔提出旋转的黑洞，称为克尔黑洞。克尔求出场方程的一个稳态轴对称解，此解描述一个以恒定角速度转动的星体外部（外部是真空）的时空弯曲的情况。那是一个处于真空状态下的不随时间变化的、轴对称的弯曲时空，称为克尔时空。当克尔时空中的物质都聚向中心时，也会出现黑洞，称为克尔黑洞，如图 2-45 所示。

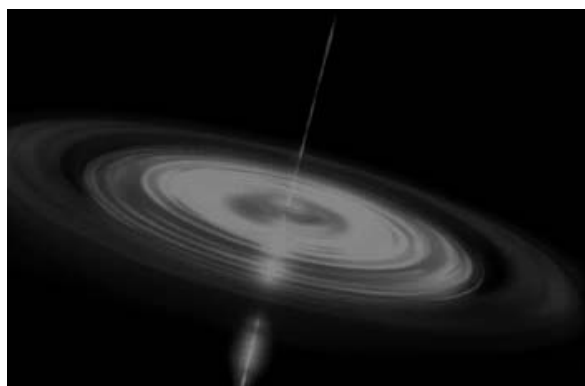


图 2-45 克尔黑洞

3. 带电黑洞

在克尔黑洞模型提出之前的 1916 年和 1918 年，雷斯勒和诺斯特朗姆从爱因斯坦场方程先后得出了带电质量产生引力场的精确解，提出了雷斯勒-诺斯特朗姆黑洞模型，即带电黑洞。

将上述两种黑洞推广到旋转带电的黑洞，这种黑洞称为克尔-纽曼黑洞，或者带电克尔黑洞。

4. 超级大黑洞

爆发星系、星系碰撞及巨大能量活动能够形成“超级大黑洞”，它一般存在于星系核心。银河系及许多星系中心都存在超级大黑洞，最大的可达到 30 亿个太阳质量，1 小时内可吞噬 600 个地球质量的物质。银河系中心的超大黑洞，据推测每小时能够吞噬 4 个地球。

第五节 结束语

广义相对论的解只表示 $r = r_s \equiv 2Gm'/c^2$ 内是洞，但时间向里是黑洞，时间向外是白洞，广义相对论并不排斥白洞的存在。

20 世纪 60 年代初，苏联的诺维可夫和以色列的尼曼等人又根据爱因斯坦场方程的史瓦西解提出了白洞的模型。黑洞是宇宙中吞噬物质和光的“陷阱”，是最“自私”的怪物；白洞却是宇宙中最“慷慨”的天体，各类高能物质乃至光线从这个源涌向宇宙，包括外来的物质和能量它也一概加以排斥。

如果恒星形成了黑洞，那么时空在史瓦西半径即视界的地方与原来的时空垂直。在不平坦的宇宙时空中，这种结构就意味着黑洞视界内的部分会与宇宙的另一个部分相结合，然后在那里产生一个洞。这个洞可以是黑洞，也可以是白洞。而这个弯曲的视界，就称为史瓦西喉，它是一种特定的虫洞，如图 2-46 所示。

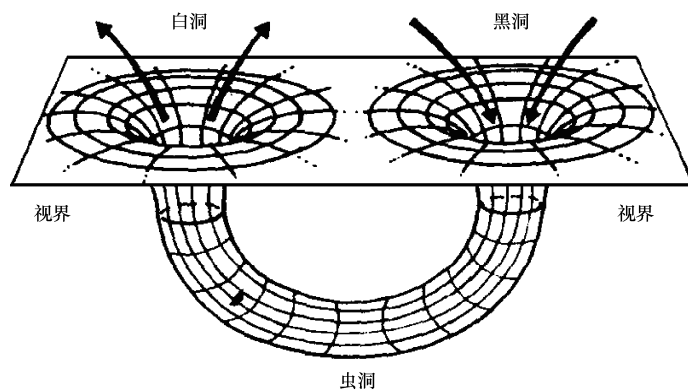


图 2-46 黑洞、白洞与虫洞

爱因斯坦和罗森（爱因斯坦的助手）计算出互不通信信息的两个宇宙间由“喉”相连，即“爱因斯坦-罗森桥”，预言了虫洞的存在。虫洞的端口就是黑洞和白洞，就是源和汇。在这里，虫洞连接黑、白二洞，物质在黑洞的奇点

处被瓦解为基本粒子，然后通过爱因斯坦-罗森桥被传送到白洞辐射出去。虫洞在物理学和工程学上能否实现呢？下一章我们将具体讨论。

还有一个小故事，1936年，爱因斯坦和罗森在发表了爱因斯坦-罗森桥的文章后，又写出一篇名为《引力波存在吗》的文章投给同一杂志（*Physical Review*）的编辑部，其文章的结论是引力波并不存在。*Physical Review* 将稿件送审。遗憾的是，这篇文章被神秘的审稿人（后来知道是普林斯顿的罗伯逊教授）因发现了错误而拒稿，这令爱因斯坦大为不满，这位大科学家甚至没有查看拒稿报告，就发誓再不与此杂志合作而投向了另一家。就在文章将要发表的前夕，爱因斯坦要作一次相关报告，他突然发现自己犯了错误，一时却又没有找到解法。大家可以想象他的窘境，在报告结束时，他说：“If you ask me whether there are gravitational waves or not, I must answer that I do not know. But it is a highly interesting problem.”

爱因斯坦认识到原先的结论是错的，事实上他的理论的确指向引力波的存在，于是爱因斯坦在文章校样上做出重大修改。巨人也有犯错的时候。

当一些有质量的物体在时空中运动的时候，曲率变化反映了这些物体的位置变化。在某些特定环境之下，加速物体能够对这个曲率产生变化，并且能够以波的形式向外以光速传播，即形成引力波。引力波是一种时空涟漪，当一个引力波通过一名观测者的时候，因为应变效应，观测者就会发现时空被扭曲，如图 2-48 所示。

1978年发现的脉冲双星运转周期减少间接证明了引力波的存在。2016年2月11日，LIGO 科学合作组织和 Virgo 合作团队宣布他们已经利用高级探测器，首次探测到了来自双黑洞合并的引力波信号。

试想：两个超大质量的星体互相旋转，周围被扭曲的时空就会发生持续的拉伸和收缩振荡。这种振荡传到地球，就是所谓的引力波，正好被精密的 LIGO 装置探测到。引力波探测填补了广义相对论实验验证的最后一块缺失的

拼图，打开了观测宇宙的一扇新窗户，有助于真正理解宇宙大爆炸原初时刻的物理过程。

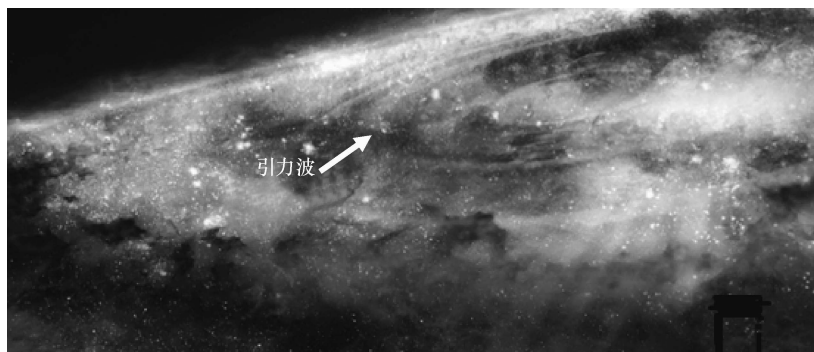


图 2-48 引力波是一种时空涟漪

宇宙是在一次大爆炸中诞生的，意味着诞生之初有一次剧烈的震动，而引力波就能还原它是否存在，有多大规模……有了引力波，就可以理解，如果在很远的星系中一个文明被高阶文明炸掉了，我们能够第一时间通过引力波知道，人们也能直观地观测到天体运动是如何合并的，又是如何发散的，这是多么神奇的事情。从物理学的角度，引力波探测意味着对宇宙微波背景辐射的测量将会进入下一个重要里程碑。另外，引力波独特的稳定性和穿透性，决定了它才是超远距离通信的基础。可以想象，未来引力波通信具有更广阔的前景，应和了本章的开头，物理学奠定了自然科学的基础，解释了我们的世界！

第三部分
PART 3 / 虫 洞



精讲视频

第一节 从广义相对论到虫洞与白洞

提起虫洞（Wormhole）的概念，人们总不免想起在苹果中被虫子啃咬出来的一个洞。仔细想一下，从苹果表面的 A 点到 B 点，沿着表面行走，当然没有沿着中间蛀出的洞里行走距离短。苹果中的虫洞若足够直的话，可以成为连接苹果表面两个点的捷径，如图 3-1 所示。物理学家希望时空中的虫洞也能如此，即成为连接两个时空区域的捷径。

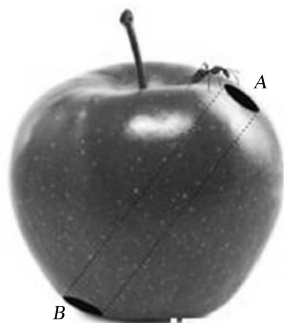


图 3-1 苹果与时空中的捷径

一、爱因斯坦-罗森桥

1935 年，爱因斯坦与罗森合作在美国物理学会 *Physical Review* 杂志上发表了一篇题为《广义相对论中的粒子问题》（*The Particle Problem in the General Theory of Relativity*）的论文。该杂志即 PRL（*Physical Review Letters*）的前身，也就是前文我们提过的曾经拒稿爱因斯坦的杂志，不过此论文早于他那篇关于引力波不存在的论文。在这篇论文中，爱因斯坦和罗森提出了后来被称为爱因斯坦-罗森桥的广义相对论的特殊解。

什么是爱因斯坦-罗森桥呢？如图 3-2 所示。上面的片（曲面）是一个字

宙，下面的片是另一个宇宙。即上下两片（曲面）是宇宙，而中间的空却不是，它是一个喉状结构，通过此喉，可以从一个宇宙到达另一个宇宙，这个喉咙就是爱因斯坦-罗森桥。这容易让人想到，可以通过此桥实现星际旅行，这也是虫洞的理论依据。不过，爱因斯坦和罗森提出这个解的用意与星际旅行毫不相干，他们的用意是文章的标题所明示的，即用场的概念来表示粒子。我们知道，爱因斯坦晚年研究的核心课题之一就是试图将场和粒子统一起来（确切地说是统一在场的框架内），这也是他寻求统一理论的一个重要环节。上述爱因斯坦-罗森桥在爱因斯坦眼里，是广义相对论的一个处处有限（因为避免了 $r=0$ 的奇点）且有可能用来表示中性粒子的特殊解。

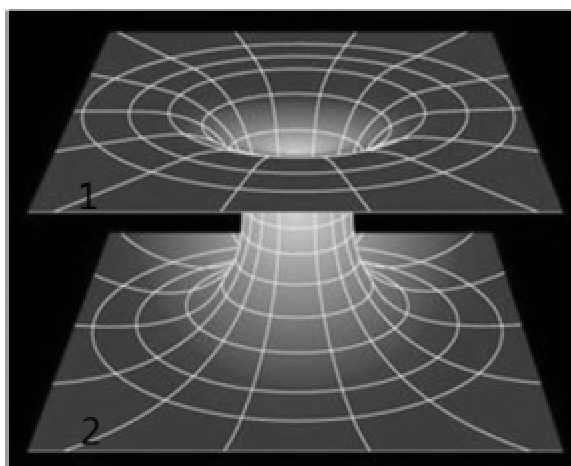


图 3-2 爱因斯坦-罗森桥

它有若干版本，其中最简单的版本是对史瓦西度规

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2 \quad (3-1)$$

作坐标变换 $r - 2m = u^2$ ，得

$$ds^2 = \frac{u^2}{u^2 + 2m} dt^2 - 4(u^2 + 2m) du^2 - (u^2 + 2m)^2 d\Omega^2 \quad (3-2)$$

这个解在 $u \in (-\infty, \infty)$ 的整个取值范围内都不包含 $r < 2m$ 的区域（从而避免了 $r = 0$ 的奇点），且在 $u \rightarrow -\infty$ 和 $u \rightarrow +\infty$ 时都是渐近平直的（因为对应于 $r \rightarrow +\infty$ ），从而像是一座连接 $u \rightarrow -\infty$ 和 $u \rightarrow +\infty$ 这两个渐近平直时空的“桥梁”。既然有“桥梁”，自然可以联想到旅行。

爱因斯坦的这一努力与他在寻求统一理论之路上的其他晚年尝试一样，并未取得成功。上述爱因斯坦-罗森桥也被称为“不可穿越的虫洞”，原因是爱因斯坦和罗森是通过本质上将黑洞外部区域覆盖两次的特殊坐标变换构造出的所谓“桥梁”，其实只是坐标缺陷带来的幻象，因为在史瓦西视界（ $r = 2m$ 或 $u = 0$ ）处，爱因斯坦-罗森桥的度规是退化的。研究表明，如果按上述理论进行星际旅行，你的结局将会是很悲惨的，因为你将不会经过任何“桥梁”，更不会到达什么渐近平直时空，而会直接落入史瓦西黑洞，只有超光速的物体才过得去，而超光速的物体和信息是不存在的。

除上述最简单的版本外，爱因斯坦-罗森桥还有更复杂的版本，被爱因斯坦和罗森用来试图表示带电粒子，但那个版本的问题更多，并且同样存在坐标缺陷。

另外，根据史瓦西得到的精确数学解及所预言的黑洞，物体到达史瓦西视界（即抵达上述爱因斯坦-罗森桥的正中央）的过程在外部观测者看来是要花费无穷长的时间的。所以这样的旅行对外部观测者毫无意义，外部观测者永远也无法看见旅行过程的完成，更不可能从中受益（哪怕是信息意义上的受益）。

因此，从物理学的角度，爱因斯坦-罗森桥是不能作为星际旅行的通道的。但爱因斯坦-罗森桥所具有的连接两个渐近平直时空的特性，在表观上与虫洞有着异曲同工之处。由于上述爱因斯坦-罗森桥是从描述史瓦西黑洞的史瓦西度规中构造出来的，因此可在一定程度上视为通过黑洞进行星际旅行这一设想的理论渊源。真正提出可以穿越的虫洞，并对这类问题进行科学研究，是从 1985 年开始的。

二、白洞的预言

通过黑洞进行星际旅行的设想还面临另外一个棘手的问题，那就是出口问题。前面我们提过，黑洞的特性是吞噬一切，作为一个星际旅行的冒险家，进入它不是问题，自身所携带的钟表也不发生钟慢效应，可以顺利地进入黑洞，然而进去之后要是不找个地方出来，结局就是悲惨的，时间与空间的坐标互换，他将“与时俱进”地奔向奇点，在接近奇点时因潮汐力被撕得粉碎。怎么避开这个悲惨的结局呢？这就引出了一个或许算得上是引力理论中最离奇的概念——白洞（White Hole）。

白洞，顾名思义，就是性质与黑洞完全相反的天体，广义相对论并不排斥白洞，如果黑洞的时间坐标向里，指向奇点，那么白洞的时间坐标则向外，它们之间性质的差别如表 3-1 所示。

表 3-1 黑洞与白洞比较

| | 黑 洞 | 白 洞 |
|------|--------------|--------------------|
| 性质 | 只进不出 吞噬一切 | 只出不进 喷射一切 |
| 条件 | 顺应引力 | 逆引力而行，依赖于极为离奇的初始条件 |
| 实验验证 | 有间接观测支持 | 无 |

物理学上，时间反演是存在的，但仅仅是理论存在，在实际过程中几乎是不可能的，或者说反过程出现的概率小到了几乎为零。举个例子，如图 3-3 所示，设有一容器被隔板分成相同的两部分，一边抽成真空，另一边充满气体，假定气体的分子数目为 N 个， N 的数值可以由阿伏伽德罗常量推知，即 1 摩尔气体含有的分子数为 6.02×10^{23} 个。如果将隔板抽掉，气体很快充满整个容器。试想一下，有没有一个瞬间，我们眼疾手快地插入隔板，正好全部气体分子又全部回到了左半边？大家一定觉得不可能实现，但是从概率的角

度来说，这种时间反演存在的概率是 $1/2^{6.02 \times 10^{23}}$ ，这个概率之小，完全可以认为不会出现。

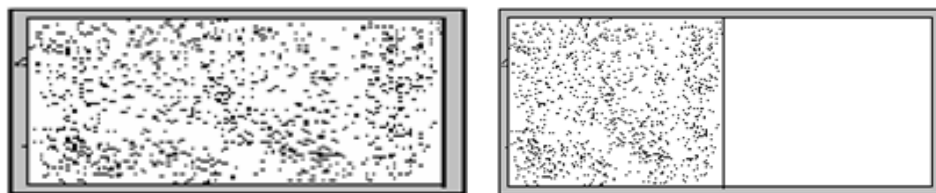


图 3-3 气体分子实验

再举另一个例子。若扔一块石头到水里，发出“扑通”的声音，并荡起一圈圈向外延展的涟漪。这个过程的时间反演，即涟漪和声波向内收缩，将石头从水里反弹到手中。虽然原则上这是可以实现的，但实际上却绝不可能出现。

事实上，白洞这一概念之所以存在，唯一的理由就是作为黑洞的时间反演，因为广义相对论具有时间反演对称性。但我们都知道，很多原则上可以存在的时间反演过程实际上几乎不可能出现，白洞作为黑洞的时间反演也是如此。广义相对论的黑洞解所具有的极大简单性，也许会给人一个错觉，以为黑洞的时间反演未必罕见，但实际上，若真要反演一个黑洞，还必须反演它的蒸发过程，仅此一点，就足以将概率降低到难以想象的小。更何况，倘若要反演物体落入黑洞的过程，还必须反演这一过程中发射的各种辐射（包括引力辐射）等，概率之小就更是无法形容了。不仅如此，所有跟黑洞有关的麻烦，在白洞上也会有一定程度的体现。比如拿最简单的史瓦西黑洞来说，物体抵达视界的过程在外部观测者看来需要无穷长的时间，相应地，假如有白洞的话，物体从视界中喷射出来的过程在外部观测者看来也将需要无穷长的时间，或者换句话说，喷射过程在外部观测者看来应该是从无穷长时间之前就开始了，这在可观测宇宙中是根本不可能实现的。因此，白洞的背后即

便不是彻底的死路，希望也是极为渺茫的，再次向“通过黑洞进行星际旅行，再通过白洞出来”的设想泼了一大瓢冷水。

三、黑洞作为星际旅行通道的缺陷

了解了黑洞作为星际旅行通道的致命缺陷后，在研究其他方法尤其是虫洞的方法是否可作为星际旅行通道时，就能有的放矢，避开这些缺陷。

第一个难题无疑是“视界”问题。黑洞周围会产生奇异现象，即在质点的周围存在一个界面——视界，其半径为 $r = r_s \equiv 2Gm'/c^2$ ，一旦进入这个界面，即使光也无法逃脱，式中定义的 r_s 称为史瓦西半径或引力半径。

根据广义相对论的时间延缓效应，在物质密度特别大的地方，也就是时空弯曲严重的地方，时钟走得特别慢，越靠近黑洞的表面，放在那里的钟走得越慢。史瓦西半径处的奇异性意味着什么？如果有一个钟摆在黑洞的表面（即视界处），则远方的人看它根本就不走。也就是说，外部观测者会看到旅行家和飞船停滞在黑洞表面而进不去，这无疑是星际旅行的最大难题。

第二个难题是潮汐力。潮汐力来自引力梯度，是由引力分布不均匀造成的。引力不能被惯性离心力完全抵消，对飞船内的物体将会产生引力差，对物体产生撕扯效果。这个引力差对地球上的人来说，就是几滴水的重量，丝毫引不起任何感觉，但是对于具有高密度引力源奇点的黑洞来说，就是可怕的，星际旅行的冒险家会和飞船一起被撕得粉碎。是避开奇点还是寻找人体能够承受的应力通道？这无疑也是星际旅行的难题。

第二节 从科幻小说到虫洞

黑洞中时空互换的特性吸引了大批科幻作家进行星际旅行的设想，而虫洞作为连接两个时空的捷径，更是科幻作家规避或者触碰光速极限实现快速穿越的极佳选择。某种程度上，虫洞概念的普及和虫洞研究的兴起，科幻作家起到了推波助澜的作用。

1985年，美国康奈尔大学（Cornell University）的天文学家卡尔·萨根发表了一部很著名的科幻小说，书名为《接触》（*Contact*），小说在12年后（即1997年）被拍成电影，中文译名《超时空接触》。在电影中，科学家艾莉·爱罗薇从小就对外太空感兴趣，并用无线电接收其他地域和空间的信号，在成长的过程中父亲却不幸早逝。后来她成为了一名天文学家，和她的小组从事天文学研究，每天都在用天线阵列巡天，接收外来信号。终于她的小组收到了一个以素数方式发送的奇怪信号，之后收到了不太稳定的电视信号，爱罗薇首先破译了这些密码，这些密码居然是生产时空机器的图纸和说明！时空机器制造出来后，爱罗薇成为人类首位与外星生命接触的使者，飞越宇宙，去与外太空的生命进行理智的接触。时空机器宛如一个原子模型，爱罗薇的坐舱被慢慢放入中心，不可思议的事情出现了：爱罗薇发现自己的坐舱变透明了，自己正在穿越一个光怪陆离的隧道，最终她来到了一个星球的沙滩上，发现欢迎她的是自己过世多年的父亲！几十小时后，爱罗薇返回，地球上的人们无论如何不相信所发生的事情：他们看到的是爱罗薇的坐舱径直掉入旁边的海中，而一切只有几分钟时间。

小说中，爱罗薇到达的星球是距离地球26光年之外的织女星（Vega），如果正常旅行，即使是光速，来回也需要52年。作为一位天文学家，萨根不能做无理由的幻想，但是实现快速旅行采用什么方法确实让萨根伤脑筋。最

初他的设想是利用黑洞，但是对引力理论并不自信，萨根想到了求助自己的老朋友——加州理工学院（California Institute of Technology）的物理学家基普·索恩（如图 3-4 所示）。

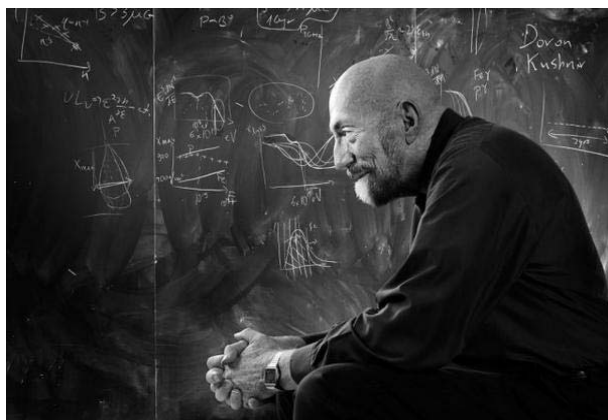


图 3-4 基普·索恩

索恩就是 2017 年因为探测到引力波而获得诺贝尔物理学奖的科学家之一，也是首次提出黑洞名称的美国物理学家惠勒的学生。除与萨根是老朋友之外，索恩和英国物理学家斯蒂芬·霍金保持了长期的好友关系。他目前担任加州理工学院费曼理论物理学教授，是当今世界上研究广义相对论下的天体物理学领域的领导者之一，也是 LIGO 早期的倡导者和现在的引导者之一。2015 年，由索恩亲自操刀撰写剧本初稿并担任影片顾问兼制片人的电影《星际穿越》，再次在全世界掀起科普电影的收视狂潮，影片中利用了大量的物理学理论知识，是科幻作品的巅峰之作。

那么索恩给了萨根什么建议呢？作为虫洞物理学中的一段佳话，索恩本人曾就此写过一段回忆。

那时，我刚刚教完 1984—1985 学年的最后一堂课，沉陷在办公室的椅子上让激情退去，这时电话铃声响了起来，打来电话的是我的老朋友、康奈尔大学

的天体物理学家卡尔·萨根。“很抱歉打扰你，基普”，他说：“我刚刚写完一部有关人类与外星文明首次接触的小说，但却有些顾虑。我希望其中的科学尽可能地准确，可我担心自己也许会搞错某些引力理论的东西。你愿意看一下并给我一些建议吗？”我当然愿意，那将是有趣的，甚至有可能是好玩的，因为卡尔是个聪明的家伙。更何况，我怎能拒绝这种来自朋友的要求呢？

之后，索恩收到了书稿，快速浏览完后，他就发现了大问题。“小说很有趣，但卡尔确实遇到了麻烦”——这是索恩读完书稿后的感觉。为什么有这种感觉呢？因为萨根在书稿中所设想的星际旅行是通过黑洞进行的，而在索恩这样的引力理论专家眼里那是一条死路。作为引力理论专家，索恩计算出如果进入黑洞中，即使有个通道，通道的出口也是白洞，但这种通道是不稳定的，只要飞船在那里一过，即使是轻微的“扰动”，中间的喉咙就会断掉，从而把通道掐死，过不去或者回不来，那么后面的故事就无法进行了。

作为老朋友，索恩义无反顾地开始操笔为萨根出谋划策，他的导师惠勒曾经提出的虫洞概念涌入索恩的脑海，也许这是个出路？经过计算，索恩有了一定的信心，也给萨根支出此招，同时也开启了自己对虫洞理论的研究。按照索恩和萨根的设计，到达织女星可以通过如图 3-5 所示的方式（图中的比

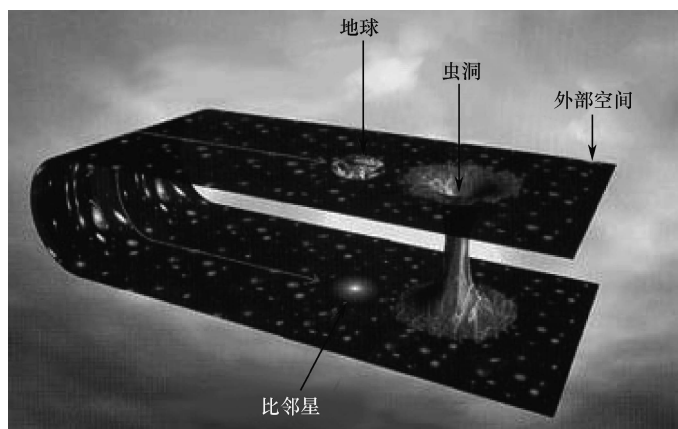


图 3-5 利用虫洞实现超时空旅行

邻星就是织女星),从地球上出发,从虫洞里穿越实现超时空旅行,出来后到达织女星。这不仅是连接两个宇宙的捷径,更能实现快速通行,而又因参照系不同,地球上看到的仅仅是几分钟而已。

和我们上面提到的有关苹果的比喻类似,宇宙就像一个大苹果,人类生活在它的表面上,而外星智慧生物则建造了穿越苹果内部的纵横交错的虫洞,作为星际旅行的通道。那么,虫洞也就是时空隧道,是连接不同宇宙的“管道”。研究表明,膨胀的宇宙有多个,每个泡代表一个宇宙,即一个膨胀的宇宙,如图 3-6 所示。膨胀的宇宙由一些管道相连,有些管道的两个开口开在同一个宇宙中,就像一个手柄一样。还有一些管道,是连接不同宇宙的,这些管道都称为虫洞。有了虫洞的概念后,时空的拓扑结构就不一样了。比如,原来我们在宇宙当中从一点运动到另一点,只可以在这个泡中走,不能出去,但可以有多种路径。现在,有了虫洞这个管道,时空从单连通变成了多连通,可选择的路径就更多了,可以通过管道,也可以不通过管道。这样一来,大量的小说、电影就可以进行想象了。虫洞更是一种时间隧道,可以到未来,也可以到过去,我们还能制作时间机器,然而这一切可行吗?

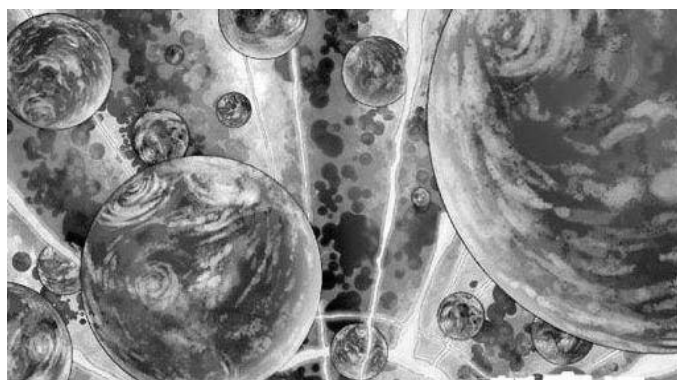


图 3-6 宇宙泡与管道

第三节 物理学理论中的虫洞

一、虫洞名字的创造者——惠勒

美国物理学家约翰·惠勒在 20 世纪 50 年代开展了所谓的“几何动力学”（Geometro Dynamics）研究，这一研究的核心目标是将物理学几何化。为了达到这一目标，一个必不可少的步骤就是将粒子（包括带电粒子）几何化，这一点和爱因斯坦与罗森研究的爱因斯坦-罗森桥的用意十分相似。事实上，上面所介绍的最简单的爱因斯坦-罗森桥正是试图用已经几何化了的引力场来表示粒子，因此可视为将粒子几何化的早期尝试。而惠勒的工作则是继爱因斯坦-罗森桥之后，这一领域内 20 年间几乎唯一重要的新尝试。这一新尝试是新兴的，可惜始终未能真正兴起该领域的研究。

惠勒 1955 年发表了题为《几何子》（*Geons*）的论文。论文中，惠勒画出了一些电磁场的力线，它们从一个口进入，从另一个口出去，无须任何电荷就显示了如同一对正负电荷所产生的电磁场。之后，惠勒又将这个电磁场结果称为“没有电荷的电荷”（Charge Without Charge）。在这种新尝试中，惠勒引进了物理空间的多连通结构，这种多连通结构的简单示意如图 3-7 所示，图中手柄状的结构即虫洞。

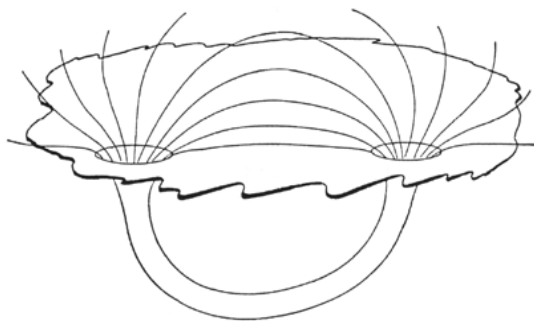


图 3-7 惠勒的虫洞

惠勒（如图 3-8 所示）是一位出色的教育家，对教育有自己独特的理解，一生桃李满天下。他有惊人之语：“要想了解一个新的领域，就去开一门这个领域的课程。”后来又说：“要想了解一个新的领域，就写一本关于那个领域的书。”他与他的学生基普·索恩合写了教材《引力》，这本书是讲述广义相对论的“圣经之作”。惠勒对教育有特殊的理解。“大学里为什么要有学生？”惠勒说，“那是因为老师有不懂的东西，需要学生来帮助解答。”20 世纪 70 年代初期，惠勒的学生贝肯斯坦提出，黑洞的视界面积正比于黑洞的熵，这一思想与当时霍金等人的“黑洞无毛”观点相悖，几乎所有的黑洞物理学家都站在霍金一边，只有惠勒支持贝肯斯坦，他说：“这个想法足够疯狂了，所以它很有可能是对的。”而事实证明，贝肯斯坦的确对了。

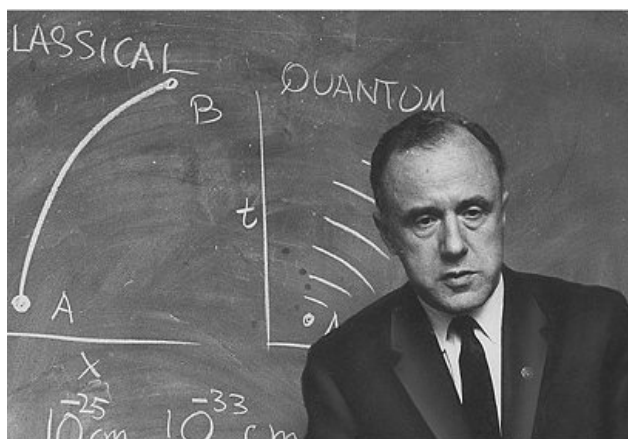


图 3-8 物理学家惠勒

惠勒最有代表性的思想是 1979 年在纪念爱因斯坦 100 周年诞辰学术研讨会上提出的延迟选择实验。据此，他给出了一个颠覆我们通常时间次序的结论：“我们此时此刻做出的决定，对于我们有足够理由说，它对已经发生了的事件产生了不可逃避的影响。”此时的决定，影响甚至决定了光子的过去。有意思的是，这个思想实验不但具有可操作性，而且可以在宇宙尺度上操作。

借此，惠勒反复强调：“没有一个基本量子现象是一个现象，直到它是一个被记录（观测）的现象”“并没有一个过去预先存在，除非它被现在所记录”。

于是，惠勒把哥本哈根学派的整体论从空间拓展到了时间。

惠勒对黑洞和引力波的存在坚信不疑。20 世纪 80 年代曾经有人质疑：“什么时候才能探测到引力波？”惠勒的回答是：“快了！”尽管这个“快了”也让我们等了 30 多年，而惠勒本人（于 2008 年去世）并没有亲眼见到引力波，但是惠勒对理论的自信仍然让人敬佩！

二、索恩的虫洞研究

惠勒提出了虫洞的概念，但当时仅停留在概念层面上，没有过多的研究细节，更没有考虑虫洞的稳定性及能否用来作为星际旅行的通道等问题，真正开始对这些问题做细致研究的还是惠勒的学生索恩。在向萨根推荐了通过虫洞进行星际旅行的设想后，索恩自己也对虫洞产生了浓厚兴趣，与他的学生迈克·莫里斯一起，开始对虫洞物理学展开认真研究，并于两年后（1987 年）发布了结果。索恩和莫里斯的研究是对虫洞结构的第一次细致研究，因而堪称虫洞物理学的开山之作。不过，索恩和莫里斯自己对他们的研究做了一个很谦虚的定位，即只定位为讲授广义相对论的教学工具。他们的论文题目是“时空中的虫洞及它们在星际旅行中的应用：讲授广义相对论的工具”（*Wormhole in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*），并发表在《美国物理杂志》（*American Journal of Physics*）上，这是一个著名的物理教学刊物，并非科研刊物，从中可以看出索恩和莫里斯对自己研究的谦虚定位。

索恩和莫里斯所研究的可作为星际旅行通道的虫洞有一个专门的名称，称为“可穿越虫洞”（Traversable Wormhole）。索恩和莫里斯是可穿越虫洞研究的开创者。

可穿越虫洞和以前概念层面上的虫洞相比，重点在于“可穿越”。那么什么样的虫洞才是可穿越的呢？索恩总结了萨根利用黑洞进行星际旅行的失败教训，首先提出要避免黑洞在此方面的一些缺陷，即“视界”和“潮汐力”。除此之外，可穿越虫洞还必须满足一些一般性的理论条件：首先，它必须满足广义相对论场方程；其次，它的物质分布必须是物理上可以实现的，这包括物质的能量、动量、张量是物理上存在的，以及物质的数量是可观测宇宙可以提供的；最后，它必须能在微扰下保持稳定，否则星际飞船通过时带来的干扰就有可能破坏可穿越虫洞。

索恩和莫里斯在计算时使用了一些简化条件，这些条件不是必需的，但是有利于计算出有用的结果。

首先，假设可穿越虫洞的度规是静态球对称的，因此也称为球对称可穿越虫洞。从数学的角度，这是为了求解方程简单方便的选择，和爱因斯坦场方程第一个精确数学解——史瓦西解的求解简化条件相同。从物理学的角度，足够大质量的天体用来克服固体应力以达到流体静力平衡时，其形状就是近于球形的。如果虫洞是一种大尺度的物质结构，它的天然形态确实有可能像其他大型天体一样接近静态球对称。

其次，假设可穿越虫洞的径向坐标值的最小处是唯一的，即所谓的“喉咙”只有一个。后面我们会看到，“喉咙”是虫洞性质最独特的地方，因此对它的简化是很有帮助的。

最后，假设可穿越虫洞的出入口分别连接渐近平直时空。可穿越虫洞的出入口所连接的渐近平直时空既可以位于同一个宇宙中，也可以位于不同宇宙中，前者称为“宇宙内（intra-universe）可穿越虫洞”，后者称为“宇宙间（inter-universe）可穿越虫洞”。这两种可穿越虫洞的主要区别在于时空的大尺度拓扑结构，而虫洞本身的结构可以视为相同。

索恩和莫里斯研究的球对称可穿越虫洞的条件如表 3-2 所示。

表 3-2 球对称可穿越虫洞的条件

| 序 号 | 性 质 | 条 件 |
|-----|------|-------------------|
| 1 | 经验教训 | 不存在视界 |
| 2 | 经验教训 | 穿越过程中受到的应力是人体可承受的 |
| 3 | 一般条件 | 满足广义相对论场方程 |
| 4 | 一般条件 | 物质的能量动量张量是物理上存在的 |
| 5 | 一般条件 | 物质的数量是可观测宇宙可以提供的 |
| 6 | 一般条件 | 在微扰下保持稳定 |
| 7 | 简化条件 | 度规是静态球对称的 |
| 8 | 简化条件 | 径向坐标值的最小处是唯一的 |
| 9 | 简化条件 | 出入口分别连接渐近平直时空 |

三、洛伦兹虫洞和欧几里得虫洞

可穿越虫洞还有两种类型：洛伦兹虫洞和欧几里得虫洞。洛伦兹虫洞能够存在一段时间，管道是真实存在的，出现洛伦兹虫洞时，我们会在天空看到一个球，这个球就是洞口。宇宙飞船如果从这个洞口进去，就会看到一条隧道，这条隧道实际上就是虫洞，它通往别的地方。虫洞处在更高维的空间中，宇宙飞船可以通过虫洞前往它的另一个出口。那么虫洞的另一个出口在哪里？它可能在别的宇宙中，即这个虫洞通往其他宇宙，那么宇航员将很难回来；虫洞的出口或者出现在我们所在宇宙中的另外一个地方，因此可以实现快速到达。比如两个洞口分别在北京和纽约，可以从北京的洞口进去，很快从纽约的洞口出来。此外，另一个洞口可能在未来或者过去，此时我们就能实现通往未来或过去的旅行。

欧几里得虫洞是另外一种虫洞。这种虫洞是看不见洞口的，它瞬时产生，可以瞬时通过；或者说物体通过它时花费的是虚时间，而不是通常的时间；或者说当它产生时，它接触到的事物就会消失，同时在其他地方或其他时间

出现。这就可以做很神奇的设想了，比如想象这种洞口从这里飘过，遇到了一个人，这个人就消失了，消失到哪里去了呢？它不需要时间，就有可能在另外一个洞口又冒出来，比如在纽约的广场上一下冒出来，是不是比魔术更神奇呢？还可以从时间的角度想象一下，他到达未来，看到了未来人类的生活；他也可能回到过去，这是前段时间盛行的穿越剧的依据。这些离奇的情境似乎都可能产生，然而科学家进一步的研究认为，这种欧几里得虫洞即使存在，也不会太大，无法通过太大的物体，只能通过基本粒子。即使是人类这样大小的物体，通过的可能性也不大。

长时间存在的洛伦兹虫洞也许有较大的，能够允许人和宇宙飞船通过，但目前尚未确认。

四、理论计算出的虫洞解

我们以可穿越虫洞为例，看看物理学家们寻找到的满足条件的具体虫洞解。前面我们理解广义相对论的场方程和运动方程时，用了惠勒的一句话：“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动”，因此求解虫洞解实际上就是代入条件求相应广义相对论的场方程，从而得到具体的解。在广义相对论中，寻找具体解的传统做法是首先给定物质分布（即物质能量动量张量的分布），然后求解广义相对论场方程以得到时空结构。这一做法体现的是物质为因、几何为果的物理思想。不过对于虫洞来说，这种做法很不方便，因为虫洞的物质分布在索恩和莫里斯的研究之前乃是无人知晓的东西，倒是它的时空结构早在惠勒的概念性研究中就已经有了直观图示（如图 3-7 所示）。因此，索恩和莫里斯采用了一个很聪明的思路，那就是将传统的做法逆转，从时空结构入手，用广义相对论场方程计算出物质分布，如图 3-9 所示。

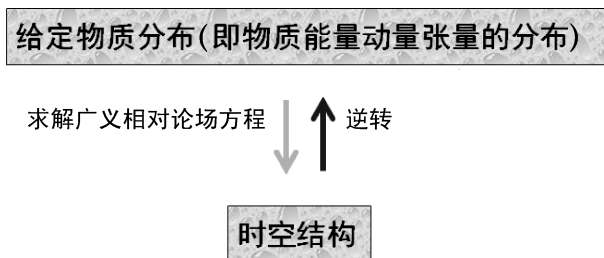


图 3-9 逆转法求解虫洞解

这种逆转在数学上是完全等价的（都是广义相对论场方程），在物理上却有着微妙的差别，那就是传统做法由于首先给定了物质分布，因此可以直接保证物质分布是物理上可以实现的（即满足表 3-2 中的条件 4 和 5），而逆转的做法却无法直接保证这一点，这一微妙差别导致的后果是存在负能物质。

由于虫洞的出入口分别连接渐近平直时空（即满足表 3-2 中的条件 9），这启示我们引入两个坐标域，分别描述出口和入口附近的时空，两者在“喉咙”处相互衔接。而度规因为是静态球对称的（即满足表 3-2 中的条件 7），其一般形式包含两个任意函数，且两者都只是径向坐标的函数。计算结果表明，要维持一个虫洞，把洞口撑开，中间还要有一个喉，把喉也撑开，且要维持它的话，就需要有负能量。

计算表明，球对称可穿越虫洞的“喉咙”附近的零能量条件会遭到破坏。由于零能量条件比弱能量条件、强能量条件、主能量条件都弱，因此它遭到破坏意味着球对称可穿越虫洞的“喉咙”附近的弱能量条件、强能量条件和主能量条件都会遭到破坏。这是索恩和莫里斯得到的最重要的结果之一，这也是逆转方法得到的结果与传统做法得到的结果的微妙差别，即需要违反能量条件的物质分布，承认负能物质存在。

什么是负能物质？根据爱因斯坦质能关系

$$E = mc^2 \quad (3-3)$$

式中， E 为物质内所包含的总能量， c 为光速， m 为物质的运动质量。一个以速度 v 运动的物体，运动质量和静止质量 m_0 的关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3-4)$$

这个总能量包括静止能量和动能，静止能量就是 m_0c^2 。换句话说，速度接近光速的物体，其动能不能写成经典理论中的 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，而应写成总能量减去静止能量。一个静止的物质也具有能量，爱因斯坦把它称为狭义相对论中最有价值的贡献。

回到虫洞解的结论，如果具有负能量的物质存在，其质量就是负的。对于负能物质，按照经典理论，给它一个力，它不是朝运动的方向加速，而是反向加速，这是负能物质的特点，因此我们也将它称为“奇异物质”。

五、负能物质

在经典物理学中，能量的零点是用真空来定义的。相对于这一零点，任何其他状态（即有物质的状态）都具有正能量，物质越多，能量就越高；物质越少，能量则越低。依照这样的定义，负能量作为比零能量更低的能量，意味着比号称一无所有的真空具有“更少”的物质，这在经典物理学中是不可思议的，甚至是错误的。

然而，我们知道，物理学的发展没有终点，经典物理学的理论在 20 世纪一直被突破。相对论和量子理论的出现修正甚至颠覆了许多经典物理学的观念。20 世纪 30 年代以后，量子力学更是蓬勃发展，“等闲识得春风面，万紫千红总是春”，似乎处处都有新发现和新突破。1928 年，英国物理学家狄拉克（如图 3-10 所示）得到相对论形式的微观粒子方程，用于表明波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 随时间演化所遵循的规律。当波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 给定后， t 时刻粒子在空间

的概率分布、粒子的任一物理量取各值的概率和平均值就确定了，这是量子力学的核心问题。在此之前，奥地利物理学家薛定谔给出了非相对论形式的波动方程。狄拉克方程为

$$(pc\alpha + mc^2\beta)\Psi = E\Psi \quad (3-5)$$

式中， p 为动量， c 为光速， m 为电子质量， E 为能量， Ψ 为波函数， α 、 β 为狄拉克引入的新观念，其意义是电子有自旋，而且自旋角动量为 $1/2$ 而不是整数。

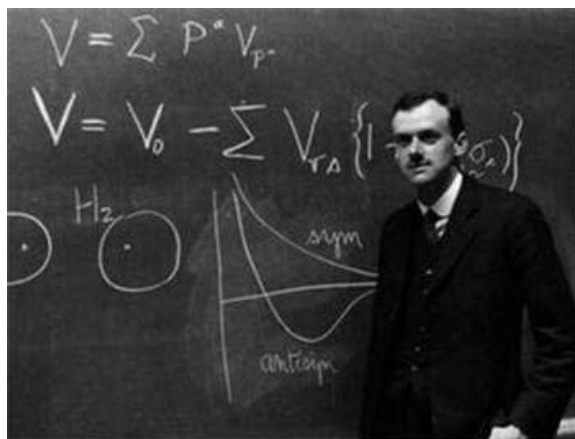


图 3-10 狄拉克

狄拉克方程形式优美，对仗工整，狄拉克不舍得破坏方程，但方程成立必须有一项前所未有的特性，称为“负能”。1931 年，狄拉克又大胆地提出反粒子理论（Theory of Antiparticles）来解释负能现象。1932 年，安德森发现了电子的反粒子，人们认识到反粒子理论又将是物理学上的一个里程碑。物理学家杨振宁用“性灵出万象，风骨超常论”来形容狄拉克风格和他的方程与反粒子理论，用“秋水文章不染尘”来形容狄拉克的文章。我们看到，一个物理学家的风格和理论与诗词歌赋完美地贴切在一起，不得不说，艺术美与

科学美是相通的。

既然实验已充分验证了狄拉克方程的正确性，人们自然期望利用狄拉克方程预言新的物理现象。按照狄拉克方程给出的结果，电子除了有能量取正值的状态，还有能量取负值的状态，并且所有正能状态和负能状态的分布对能量为零的点是完全对称的。自由电子最低的正能态是一个静止电子的状态，其能量值是一个电子的静止能量，其他正能态的能量比一个电子的静止能量要高，并且可以连续地增加到无穷。与此同时，自由电子最高的负能态的能量值是一个电子静止能量的负值，其他负能态的能量比这个能量要低，并且可以连续地降低到负无穷。这个结果表明：如果有一个电子处于某个正能状态，则任意小的外来扰动都有可能促使它跳到某个负能状态而释放出能量。同时由于负能状态的分布包含延伸到负无穷的连续谱，这个释放能量的跃迁过程可以一直持续不断地继续下去，这样任何一个电子都可以不断地释放能量，成为“永动机”，这在物理上显然是完全不合理的。所以狄拉克大胆猜测所有的负能态都已经被电子占据，而泡利不相容原理则会阻止正能态的电子向已经被完全占据的负能态跃迁。这个猜想实际上说明了物质被“浸泡”在费米子（如电子）的“海洋”中，也就是狄拉克之海。

通俗地说，经典物理学中的“真空”一无所有，既然已经一无所有，还能有比它更少的吗？回答当然是否定的。但是，量子力学中的真空所表示的是量子场的基态，它与其他状态（即有物质的状态）的区别，不过是量子场能级的“低”和“高”之间的区别而已，定量多过定性。真空在量子理论中不仅像其他状态一样有自己的结构，而且还是高度动态的，随时可以有虚粒子对的产生和湮灭。在这种全新的、不再“一无所有”的真空下，负能量至少从概念层面上来讲不是错误的，因而是可以存在的。

这里还需要指出的是，负能物质经常和反粒子联系在一起，但是，负能物质不是反物质，也不是暗物质。反物质是指构成物质的原子的原子核都是

由反质子和反中子组成的，反质子与质子一样，只是带的是负电，反中子和中子的差别在于磁矩的不同。安德森发现的正电子是围绕着这种“反核”转的电子，它和普通电子的差别也仅仅在于带正电，这就是反物质。反物质和正物质一样，质量是正的。

再来说说暗物质，暗物质的质量也是正的，它产生万有引力。负能物质不具有暗能量，暗能量的能量还是正的，只不过因为压强是负的，所以才有排斥效应。暗物质不受电磁力的影响，不发光也不吸收和反射光，所以我们看不到它。科学发展到今天，我们对世界的认识却极其有限，我们自己认为的客观世界是有形的，它只占宇宙的 4%，其余 96% 的物质存在的形式是我们根本不知道的，那就是暗物质和暗能量。

六、负能物质的理论与实验验证

1948 年，荷兰物理学家卡西米尔发表了题为《论两块理想导体板之间的吸引》（*On the attraction between two perfectly conducting plates*）的论文，对两块相互平行的理想导体板之间的真空能量面密度（即单位面积导体板之间空间内的总真空能量）进行了计算。计算结果表明，其能量面密度确实是负的！在真空中放置两块金属板，就会感到这两块金属板之间有一种吸引力，向中间靠，当然这并不是因为两块金属板分别带正负异号电荷，那样的力是库仑力，不足为奇。卡西米尔给出的两块金属板是绝对不带电的，然而平行放置以后会产生吸引力，原因是什么？既然量子理论的真空是有结构的，那么不难想象，这种结构与几乎所有其他物理体系的结构一样，会受边界条件的影响。这就启示我们考虑特定边界条件下的真空，假如那种真空的能量比“普通”（即边界可以忽略的）真空具有更低的能量，那么就可以视为一种负能量。更重要的是，能量面密度与平行导体板的间距有关（这是可以预料的，因为

当间距趋于无穷时，因边界条件而产生的能量面密度必须消失），从而意味着平行导体板之间会因这种能量的存在而产生一种相互作用力，这种相互作用力称为卡西米尔力（Casimir Force），如图 3-11 所示。

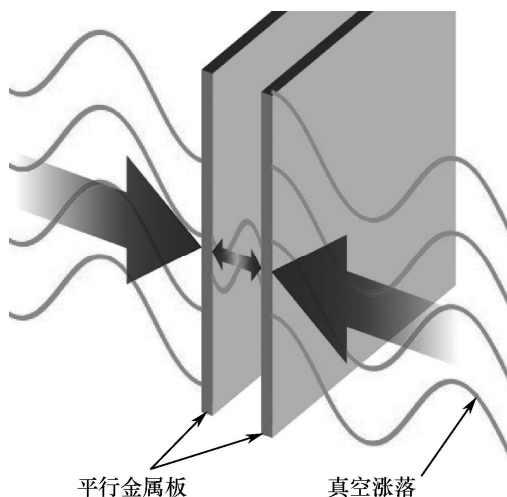


图 3-11 卡西米尔力

卡西米尔认为，将两块金属板放到真空中后，就相当于将真空挖了两个洞，真空的拓扑结构就变了。前文我们提过，所谓真空，在现代理论中不是绝对的空，真空中会不断地产生虚的粒子对，虚的正粒子和反粒子产生又湮灭，如此循环。同样，它也要产生虚光子对，在真空中不断有虚光子产生和湮灭。但是，光是电磁波，如果虚光子产生在这两块板之间，电磁场在金属板上的电场强度因静电平衡而必须为零，因此在两块板之间的虚光子就必须形成驻波。这就意味着，两板之间的距离必须是虚光子波长一半的整数倍，即必须满足下式：

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (3-6)$$

式中， L 为两板之间的距离， λ 为虚光子的波长， n 为整数。这就意味着两

板之间不是什么样的光子都是可以存在的，只有那些波长满足式 (3-6) 的形成驻波的虚光子才能存在，这对板间虚光子的数量有了限制。但两板之外真空中的虚光子却不受这个限制，什么样的波长都可以，这就造成板外的虚光子数量远远多于板内的虚光子数量，从而产生一种向里的压力，即卡西米尔力。

我们知道，真空是能量的零点，而两板之外的真空就和普通的真空一样，能量为零。整个能量零点包含了真空涨落产生的虚粒子的贡献，而两板之间的区域呢？因为虚光子数量减少了，所以那里的能量是低于一般真空的能量的，于是就呈现负能量。

平行导体板情形下卡西米尔效应的计算过程我们不多牵涉，但是为了以后的说明更方便，我们需要罗列出其计算结果来。

平行导体板情形下卡西米尔效应中的真空能量面密度约为

$$\rho_E = -\frac{4.3 \times 10^{-28}}{d^4} \text{ J/m}^3 \quad (3-7)$$

式中， d 为两块平行导体板的间距。根据爱因斯坦质能关系，我们可以将式 (3-7) 换算成质量密度，为

$$\rho_m = -\frac{4.8 \times 10^{-45}}{d^4} \text{ kg/m}^3 \quad (3-8)$$

再由此计算出卡西米尔力，其面密度为

$$F = -\frac{1.3 \times 10^{-27}}{d^4} \text{ N/m}^2 \quad (3-9)$$

由上面的计算结果不难看出，卡西米尔效应是一个量子效应，这个负能量实际是很小的。

卡西米尔效应的实验验证虽然从 20 世纪 50 年代起就陆续有人在做，但是卡西米尔效应太微弱了，直到 20 世纪 90 年代后期，才开始有了较高精度的验证。卡西米尔力反比于平行导体板间距的 4 次方，从而可以通过缩小平

行导体板的间距而得到非常显著的“放大”，这是实验验证中一个最重要的努力方向。比如平行导体板的间距若能缩小到微米（ μm ）量级，力密度就可以增加到千分之一牛顿每平方米的量级。不过，让两块导体板靠得如此之近而又互不接触绝非易事，通常只有对很小的导体板才能做到，而导体板越小，作用在导体板上的力的总量也将变得越小，从而又反过来增加了检测难度。

所幸的是，卡西米尔效应并不局限于平行导体板，而早已被理论物理学家们推广到了各种更复杂的情形，比如针对其他形状、非理想导体板、电介质板、有限温度等，为实验研究提供了多种选择。华盛顿大学（University of Washington）的物理学家拉莫里奥克斯于 1997 年发表的（实验完成于 1996 年）针对一块导体板与一个导体球之间的卡西米尔效应，克服了让两块导体板靠得极近而又互不接触的困难，验证精度可达到 5% 左右。

除卡西米尔效应外，还有一些其他量子效应也能在某些特定区域产生负能量。因此，奇异物质的存在是毋庸置疑的，这对于可穿越虫洞来说无疑是“利好消息”。

综上所述，我们可以得到如下结论：

- 所有负能量都是源于量子效应的，因而非常微小；
- 负能物质（奇异物质）的存在离不开以特殊方式配置起来的环境条件，它的移动也必须伴随环境条件的变更，而这些不可或缺的环境条件都是由普通物质构成的，完全有可能对奇异物质产生主要是引力效应的影响，即产生重大干扰，甚至彻底地被抵消和淹没；
- 负能物质确实是存在的，但它能否用来构筑可穿越虫洞，从其量子效应来看，让人担忧。

第四节 构建虫洞

一、构建虫洞的物理学模型

大家知道，构建物理模型是物理学家解决物理问题最擅长、最行之有效的办法。从哲学的角度讲，就是抓住主要矛盾，忽略次要矛盾。过去，物理学与哲学的分界不清，物理思想影响着哲学思想，所以这个方法也是两大学科共有的。

从抓主要矛盾的方面来思考，构建虫洞，就是以最简单的形状和最少的用料构建一个可穿越的虫洞。这个可穿越，至少要可穿越人体大小甚至宇宙飞船大小。

什么是最简单的形状呢？涉及虫洞具体结构的计算通常不太容易，我们只能用近似的方法让计算变得简单。建立物理模型，大家首先会想到利用柱状结构，而为了节约材料，就构建一个“薄层结构”（Thin Shell）。所谓薄层结构，是物理学上认为厚度远远小于纵向长度和横向尺度的结构，即数学上被假定为无限薄的结构（厚度趋于零），相应的物质分布呈现 δ 函数的形式。可以看出，薄层近似的要点是将物质分布近似为厚度无限小的薄层分布，后面研究虫洞物理学的许多计算都采用了这一近似。

薄层近似不仅具有数学上的简单性，从工程学的角度讲也是最优化和节约成本的。在上节的讨论中我们知道，构筑虫洞需要用到的物质是负能物质，即奇异物质，而奇异物质的量是非常微小的。卡西米尔效应从理论上被提出到实验上被验证，相隔了差不多半个世纪的时间，主要原因也正在于此。从“工程学”的角度讲，节约成本，就是将这种数量非常微小的奇异物质的用量尽可能地减少，而减少用量的途径之一就是将它的使用范围尽可能地局限起

来，比如局限在薄层上。图 3-12 所示为柱状可穿越虫洞，我们能从形状看出这是个空洞。

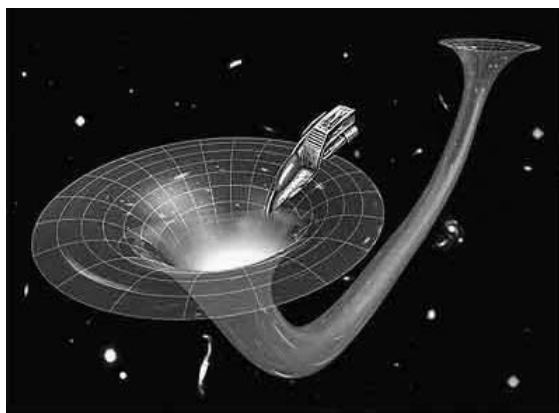


图 3-12 柱状可穿越虫洞

二、薄层近似下奇异物质的数量

上节我们讲到负能量，黑洞附近也有负能量，但是黑洞到目前为止还只能间接观测，而且黑洞附近的负能量也很弱。那么虫洞呢？尤其是撑开一个可穿越虫洞所需要的负能量有多大呢？或者说，需要的负能量奇异物质的量是多大呢？

其实，从拓扑学的角度来讲，构建虫洞意味着拓扑结构的改变，这是不可能的，更准确的说法是维持一个虫洞，不过作为较形象的说法，我们还是延续“构建”二字。利用广义相对论和薄层近似，物理学家们对构建可穿越虫洞所需要的奇异物质的数量进行了计算，得到下式：

$$M = -\left(\frac{c^2}{G}\right)F_s r_0 \quad (3-10)$$

式中， M 表示构建可穿越虫洞需要的奇异物质的数量；负号是奇异物质的特

征，即它是负能量物质； c 为光速； G 为万有引力常数； F_s 为比例系数，与薄层结构相关； r_0 为虫洞半径，依前文所述，虫洞是一个柱状的空洞， r_0 即此圆柱的半径。

将已知的万有引力常数和光速的数值代入，单从数量级上得到结论如下：

- 构筑一个半径为 1cm 的虫洞，可以想象这样的虫洞并不对人和宇宙飞船等物体的穿越具有意义，但是需要的奇异物质相当于地球质量；
- 构筑一个半径为 1km 的虫洞，这样的虫洞应该是人和宇宙飞船等物体可穿越的，具备一定的现实意义，但是需要的奇异物质相当于太阳质量；
- 构筑一个半径 1 光年的虫洞，是为了解决一个应力问题提出的假设，具有一定的现实意义，但需要大于银河系发光物质总量一百倍的奇异物质。

读者可能觉得上述结论只有第二类具有意义，其表达式可以写为

$$M = -M_{\odot} r_0 \quad (3-11)$$

式中， M_{\odot} 表示太阳质量，其数量级为 10^{30} kg ；虫洞的半径 r_0 在这里以千米为单位。由此我们可以想象一下所需要的负能量物质的数量。

再把这个结果和卡西米尔效应得到的奇异物质的数量公式（3-8）对比一下，卡西米尔效应绝对是一个量子量，而这里却是一个天文数字，两相对比，心一下就凉了。

这里至少面临着两大困难。一是量子效应的物质能否累计？二是从哪里能取来数量如此巨大的负能物质？也许还有一些困难有待进一步探讨，这样构建出来的虫洞会不会有其他方面的问题导致穿越也是不可行的呢？

三、薄层近似下虫洞的应力分析

电影《超时空接触》中，女主人公依靠成功破译接收到的外来信号，

得到了制造时空穿越机器的图纸，依此而建并实现了超时空的穿越，穿越的过程影片用了大量的特效处理，它所穿越的则似乎只是一条狭小的通道，然而却在不断地震动，且震动越来越强烈，以至于座椅都要坏了。星际飞船的周围充斥着星光组成的绚丽幻象，光怪陆离，如图 3-13 所示。这样处理，一方面是为了渲染效果，另一方面也是考虑到穿越虫洞会受到应力影响。



图 3-13 星际飞船穿越虫洞的特效处理

在表 3-2 中，球对称可穿越虫洞的条件 2 是穿越过程中受到的应力应是人体可承受的，那么我们构建的虫洞中的应力是不是人体可承受的呢？具体地说，穿越虫洞时，宇宙飞船及宇航员将会遇到两种不同类型的应力：一种是来自虫洞物质本身的张力，另一种则是虫洞引力场所产生的潮汐力。

先来说明张力。以球对称可穿越虫洞为例，物理学家计算出了结果，在虫洞的喉咙附近，单位面积上产生的张力如下：

$$T = \frac{5 \times 10^{10}}{r_0^2} \quad (3-12)$$

式中， T 表示虫洞物质产生的单位面积上的张力，单位为 N/m^2 或 J/m^3 ；虫洞半径 r_0 以光年为单位。

需要特别注意的是，虫洞半径没有采用“米”这样的国际单位（对宇宙这样的大尺度来说，米确实太小），也没有采用“千米”（恐怕和刚才说的原因相同），而是采用了光年那样的巨大单位，约为十万亿千米，广泛用于天文学上计量天体距离。

因此，式（3-12）表明：一个半径为一光年的球对称虫洞喉咙附近的张力大小约为 $5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，它相当于在每平方米的面积上压上 500 万吨的重物，这样的重量是不堪忍受的。换句话说，一个冒险进入虫洞的宇宙飞船和宇航员，从这样虫洞的中心通过，是不可能活着出来的。

我们还注意到，这个单位面积上的张力与虫洞的半径平方成反比，那么前文提到，构筑一个半径为 1km 的虫洞，这样的虫洞应该是人和宇宙飞船等物体可穿越的，具有一定的现实意义，但是需要的奇异物质相当于太阳质量；而且，在虫洞喉咙附近的张力是多大呢？代入后得到的结果是 $5 \times 10^{36} \text{ N/m}^2$ ，这相当于在每平方米的面积上压上 5 亿亿亿亿吨的重物，其后果可想而知。

利用张力与虫洞的半径平方成反比这个特点，要减小张力，就必须增大虫洞半径。但是构筑一个半径为 1km 的虫洞所需的奇异物质的数量就相当于一个太阳的质量。由于 1 光年约为十万亿千米，因此构筑一个半径为 1 光年的虫洞所需的奇异物质的数量需要大于银河系发光物质总量的 100 倍，约相当于太阳质量的 10 万亿倍！我们从来没有见过如此巨大数量的负能物质，也远远不知道从哪里获得这么多负能物质，形势再次变得异常严峻。

尺寸越大，张力越小，但所需奇异物质的数量却巨大，这个矛盾可通过表 3-3 清晰地呈现给读者。

表 3-3 薄层近似下球对称可穿越虫洞面临的困境之一

| 虫洞尺寸 | 负能物质数量 | 虫洞物质产生的单位面积上的张力 | 张力的说明 |
|---------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 半径 1cm | 相当于地球质量 | $5 \times 10^{46} \text{ N/m}^2$ | 相当于每平方米的面积上压上 5 亿亿亿亿吨以上的重物 |
| 半径 1km | 相当于太阳质量 | $5 \times 10^{36} \text{ N/m}^2$ | 相当于每平方米的面积上压上 5 亿亿亿吨的重物 |
| 半径 1 光年 | 大于银河系发光物质总量的 100 倍，约相当于太阳质量的 10 万亿倍 | $5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ | 相当于在每平方米的面积上压上 500 万吨的重物 |

再来谈谈第二种应力——潮汐力。前文我们讲过潮汐力，其根源是引力场的不均匀性。由于这种不均匀性，物体上相距 Δx 的两点所感受到的引力加速度会有所不同。根据广义相对论等效原理，引力加速度本身的效应是可以通过等效原理消去的，但不同点所感受到的引力加速度 a 不同，即 Δa 是无法消去的，从而将体现为一种额外的作用，那就是潮汐力。潮汐力是一种常见的力，地球上人感知不到是因为潮汐力太小，但月球引力对海洋和河流湖泊的主要影响就有一种明显的表现形式：潮汐。广义相对论可计算出 Δa ，这里写出球对称虫洞 Δa 的径向分量和横向分量：

$$\Delta a_{\parallel} = \frac{2GM}{r^3}(\Delta x)_{\parallel} \quad (3-13)$$

$$\Delta a_{\perp} = -\frac{GM}{r^3}(\Delta x)_{\perp} \quad (3-14)$$

式中， G 为万有引力常数； M 为虫洞的质量； r 为距离虫洞中心的距离； $(\Delta x)_{\parallel}$ 为两点之间的径向距离， $(\Delta x)_{\perp}$ 为两点之间的横向距离；横向加速度 $(\Delta a)_{\perp}$ 的表达式带有一个负号，表示物体在横向上会被压缩，而径向加速度 $(\Delta a)_{\parallel}$ 的表达式不带负号，表示物体在径向上会被拉伸。

现在以史瓦西虫洞（接近于史瓦西黑洞）为例进行说明。因为潮汐力的作用，当星际飞船接近虫洞时，宇航员会渐渐感觉到自己的身体在虫洞的方

向（即径向）上被拉伸（当然同时沿径向拉伸的还有宇宙飞船），而在与之垂直的方向（即横向）上被挤压。这种感觉一开始只是让人稍有不适，但由于潮汐力的大小反比于距离的 3 次方，因此随着宇宙飞船的继续前行，潮汐力会迅速增加，距离每缩小 1/10，潮汐力就会增加 1000 倍。当飞船距离虫洞中心还有 1000km 的时候，潮汐力的大小就基本达到了人体所能承受的极限。可以想象，如果这时候飞船还不立刻返航，那么宇航员将在强大的潮汐力作用下被撕得粉碎。再往前飞行一段距离，飞船本身也将在潮汐力的作用下解体。即使最终能从虫洞另一端飞出，也不可能是完整的宇宙飞船和宇航员，而只是碎片或者飞船和人体的残骸而已！更何况如果把虫洞喉咙附近奇异物质的张力可能起到的破坏作用也考虑进去的话，那么飞船及宇航员的残骸还可能被进一步撕裂，由虫洞另一端飞出的就可能是一串无法分辨来源的亚原子粒子！

由此可见，试图穿越半径为 1km 的史瓦西虫洞的星际旅行家，其结局将是悲惨的。从潮汐力的角度看，半径 1km 的史瓦西虫洞是无法作为星际旅行的通道的，而且，包含潮汐效应在内的虫洞的巨大引力场会在周围一个很大的范围内产生毁灭性的破坏力，出入口位于行星表面的虫洞都是极不可能存在的。

那么，什么样的虫洞产生的潮汐力才是在整个穿越过程中人体能够承受的呢？对史瓦西虫洞来说，不难估算出其半径要在几万千米以上才行。那么同样的问题就摆在面前：半径越大，需要的负能奇异物质的量越大，相应地，所需要的奇异物质的数量则相当于太阳质量的几万倍以上，这些奇异物质又要从哪来呢？

基于这两小节的讨论，我们得到的基本结论是：可穿越虫洞的半径必须很大，才能保障穿越过程中遇到的应力是人体能够承受的。相应地，所需奇异物质的数量也必须很大，大到几乎没有实现的可能。由此看来，利用虫洞穿越需要另辟蹊径。

四、实现虫洞穿越的其他设想

面临困难，科学家和科幻作家都在想各种办法予以解决，这些办法是否真实可行有待讨论。作为对虫洞研究的一部分，这里我们也做一个简单的介绍。

1. 信息穿越虫洞的奇想

我们需要的仅仅是传输信息，而作为肉体的人会因为潮汐力被撕得粉碎而无法存活，那么如果我们只把地球上的某个人的信息传递过去呢？因为物质的基本结构都是相似的，因此在那边再组装一个此人，此人不就传递过去了吗？可是这里面临的问题是，我们传输的信息，是牵涉到思想、意识、智慧、肉体、经验、能力等多方面的，这些信息是不是能够一并传输？科学和科幻的差距太大。信息传递奇想的示意图如图 3-14 所示。

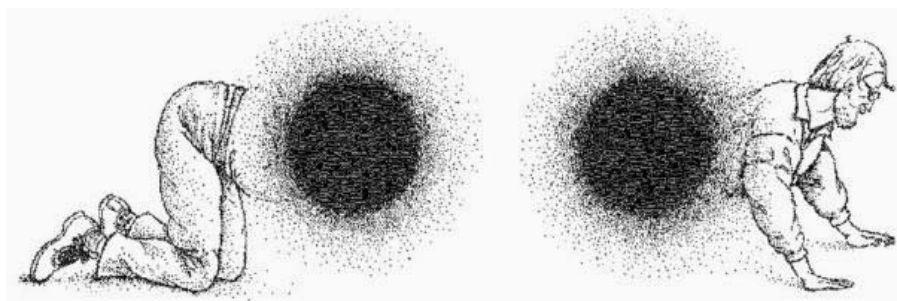


图 3-14 信息传递奇想

2. 生命传输机的奇想

这个奇想应该说来自电影《星际迷航》，或者说来自科幻作家。聪明的作家在想，如果人类会因为潮汐力被撕得粉碎而无法实现穿越，那么能否把人体分解成基本粒子进行传输？这里避开了第一种设想的困难，人站在一台特殊的机器——生命传输机下面，快速穿越到达另一星球后复原，当然复原后还是原来的那个人，如图 3-15 所示。



图 3-15 生命传输机奇想

倘若把这种技术与虫洞结合起来，那么通过虫洞传输的将只是组成人体或传递信息的基本粒子。这虽然也绝不是一件容易的事情，但构建虫洞中最令人头疼的，罗列在表 3-2 中的第 2 个条件“穿越过程中受到的应力是人体可承受的”这一要求，以及由此导致的有可能极为巨大的奇异物质数量，也许就不再是严重问题，从而大大增加了利用虫洞进行星际旅行的可能性。

这种方法的最大问题已经超出了物理学的范畴，而应该是生命科学的范畴。人，能否被分解成携带信息的基本粒子，然后再完美复原呢？

3. 用更加简单稀少的物质构建虫洞的设想

薄层近似也许不是奇异物质用量最少的设想，物理学家们研究了形状为立方体或者长方体的虫洞结构，研究时意外发现这种虫洞的奇异物质只需要

分布在 12 条棱上即可，如图 3-16 所示。这意味着：一是奇异物质的用量会大幅度地减少；二是宇宙飞船不必与奇异物质直接接触就能穿越虫洞，是不是可以避免虫洞物质的张力对宇宙飞船和宇航员的重压呢？

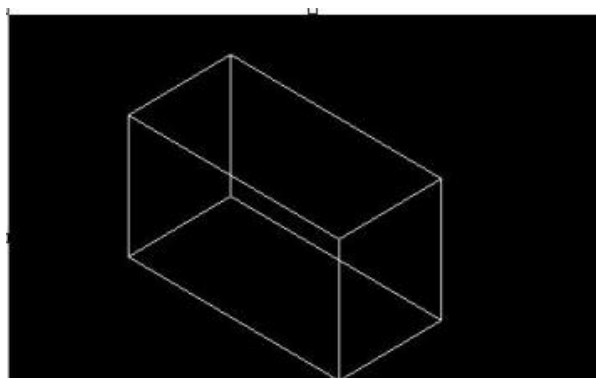


图 3-16 立方体的虫洞结构

进一步研究这种虫洞结构还有一些可喜的结论：这种结构的虫洞的潮汐力能够避开，其径向加速度可以彻底消除，横向加速度可以通过限制飞船速度加以控制。这些结论让宇宙飞船和宇航员能够有效地避开这种特殊结构的虫洞产生的潮汐力。

然而，计算的结果却是，即使只有 12 条棱，在 12 条棱上奇异物质的张力却同样是巨大的，居然达到了不可思议的 10^{43} N 的惊人数值，这个结果出乎意料，却也不可避免，因此让这种结构构建的虫洞再次陷入巨大的困难之中。

实际上，除了奇异物质数量和应力之间的矛盾，两大应力同时避开也是几乎不可能的，因为它们的条件不相同。

五、构建虫洞面临的其他困难

前文我们讨论的是如何维持虫洞的问题，要完全从无到有地构建一个虫洞，还将面临一些困难。

1. 虫洞究竟有没有可能被构建出来

我们仍然用苹果做比喻：如果人类生活在苹果的表面上，而虫洞是穿越苹果内部的通道，那么很明显，这样的通道是对苹果表面拓扑结构的一种改变。因此，从无到有地产生虫洞意味着“拓扑改变”（Topology Change）。那么拓扑改变是不是有可能实现呢？

研究黑洞的明星、物理学家霍金及其同事也证明了这样的结果：在有界（“紧致”）且具有良好因果性质（能定义明确的时间方向，且不包含闭合类时曲线）的时空中，拓扑改变是不可能的。除此之外，如果假定时空是全局双曲的，则还可以证明这样的结果：全局双曲时空必定可以分解为空间部分和时间部分，其中空间部分（即对应于任一时间坐标的类空超曲面）全都具有相同的拓扑结构。这同样意味着拓扑改变是不可能的，此结论保证了定义拓扑改变所需要的“将时空流形分解为空间部分和时间部分”是可以做到的。

什么是类时曲线、类空曲线呢？举例来说，一个人站在原地，那么他在三维空间中一定是一个点，空间位置不动，与时间轴平行，呈现出一条直线，也就是世界线；如果他匀速运动，那么就会呈现出一条斜线，如果变速运动，就会是曲线。这种曲线只要是描述亚光速运动的，就称为类时线，如果是描述光速运动的，就称为类光线，如果是超光速的，就称为类空线。类空线不能传递信号，也不能通过物体。

另外，研究表明，构建虫洞的负能物质数值越大，所能维持的时间越短。这再次给构建虫洞提出了巨大挑战。

由此可以看出，我们将无法构建虫洞，虫洞可能仅仅在空间初始结构中存在，而我们能做的不过是把已经存在的虫洞“放大”“维持”，使之变成可穿越虫洞。

2. 虫洞究竟是不是星际旅行的捷径

虫洞被认为是星际旅行的捷径，离不开我们对外部空间的认识，就像图 3-8 那样，我们认为外部空间被弯曲成了 U 形，如果我们想要到达另一空间，虫洞的捷径看起来是理所应当的。但问题是，假若外部空间本身就是渐进平直的呢？此时虫洞就不一定是捷径，反而是绕远，这一点一直是被忽略的。

第五节 由虫洞到时间机器

与虫洞相联系的，不仅仅是空间，还应该有时间。对于熟悉相对论的人来说，这其实是不难想到的，因为虫洞作为连接两个时空区域的捷径，可以说是在某种意义上实现了超光速旅行，或者从外部时空的角度看，使得类空事件之间的物理联系——因果关系——成为了可能。另外，在相对论中，类空事件的时序是与参照系的选择有关的。因此虫洞从某种意义上讲可以说是开启了因果颠倒的大门，而这正是时间机器的重要特征。因此，虫洞与时间机器有可能是存在联系的。

1895 年，狭义相对论问世前十年，广义相对论问世前二十年，或者说早在相对论、黑洞甚至虫洞问世之前，科幻作家们就已创作出了不少有关时间机器或时间旅行的故事。最著名的是英国科幻作家威尔斯发表的著名小说《时间机器》（*The Time Machine*），威尔斯是一名既有科学知识，又有历史、人文知识的作家，他的小说轰动一时，然而却不是和虫洞联系在一起的。真正对时间机器开始研究，是在相对论诞生之后。前文所讲的萨根的《超时空接触》中，女主人公利用外来信号，进行密码破解，发现并制造出了时间机器，实现了超时空旅行。

1986 年，索恩和莫里斯在芝加哥参加了一次天体物理学会议，当时还是研究生的莫里斯遇到了中康涅狄格州立大学（Central Connecticut State University）的物理学家罗曼。作为聊天的话题，罗曼问莫里斯，最近在研究什么。莫里斯介绍了他和导师索恩正在研究的内容——虫洞，也许是因为对虫洞本身倾注了太多注意力的缘故，当时的索恩和莫里斯并没有关注到像虫洞与时间机器的关系那样的衍生课题，当时他们关于虫洞的研究已接近尾声，然而，罗曼听完莫里斯的介绍后却一语中的：“如果虫洞能让人以比光速更快

的速度跨越空间距离，那是否意味着能用它旅行到过去？”

罗曼的问题使索恩和莫里斯立刻投入到了对虫洞与时间机器关系的研究之中，后来罗曼自己也涉足了虫洞与时间机器领域的研究，他们给出了一个构建时间机器的方案。

一、构筑时间机器

在科幻作家的眼里，利用已知的科学知识加上幻想，构建时间机器就不仅仅是梦。听起来也很有道理，比如建造虫洞型时间机器可以用以下三个不太简单的步骤来完成。

(1) 寻找或建立一个虫洞，开辟一个隧道用来连接太空中的两个不同区域

大型虫洞可能天然地存在于外太空中，是宇宙大爆炸的遗留物（这个还存在争议，也许事实并非如此，可能这样的虫洞不存在）。我们只好凑合着使用比原子更小的虫洞，它们或者是自然的产物（在我们周围，每一瞬间都有这种小型虫洞诞生和消亡），或者是人造产品（它们由粒子加速器生产出来）。这些更小的虫洞必须被扩大到实用的尺寸，也许要使用那些在宇宙大爆炸不久后导致空间膨胀的能量场。宇宙的时空结构膨胀可能包含了微小的虫洞，根据量子力学的原理，虫洞可能随机出现或消失。科学家们认为，也许可穿越的虫洞是量子级别的，像原子内的泡泡存在于世界各处，大小仅为原子核的十万亿亿分之一。这只是原理上可行，并不适用于任何我们已知道的技术，但是至少能够让你相信可以利用。

(2) 使虫洞稳定下来

注入利用所谓的卡西米尔效应中由量子产生的负能量，虫洞便允许信号和物体安全地穿越它。负能量会抵制虫洞坍缩为密度无穷大或接近无穷大的一点的趋势。换句话说，它阻止了虫洞演变成黑洞（前文我们讨论过，至于能允许多大的物体穿过，穿过后虫洞是否还稳定这里就没有涉及）。

(3) 牵引虫洞

用一艘具有高度先进技术的太空船将虫洞的入口互相分离开。一个入口可能被安置在中子星表面，那是一颗拥有强大引力场、极度致密的恒星。强大的引力使得时间变慢，因为在虫洞的另一个入口处，时间流逝得更快，结果这两个入口不但在空间内而且在时间上都被分离开了。

这里利用了一些知识，但是对细节问题却缺乏依据，真正的时间机器构建还是来自物理学家。

罗曼和索恩等人合作，提出了用两个虫洞构建时间机器。不久之后，他们又提出了一个新方案，将两个虫洞减少为一个。所用的虫洞是洛伦兹虫洞，它需要有两个洞口，洞外的距离远大于洞内的距离。然后通过以下三个步骤实现构建时间机器，这是一个标准方案。

(1) 构筑一个虫洞或利用一个现成的虫洞

物理学家们仍然采用抓主要矛盾的方法，忽略构建虫洞本身的所需物质等“工程学”范畴的细节，将之抽象为一个对相距 L 的两条世界线 $(t, 0, 0, 0)$ 和 $(t, 0, 0, L)$ 作等时连接的通道，如图 3-17(a)所示。这里的 L 是虫洞的入口和出口之间沿外部空间（即不通过虫洞）所测得的距离。“等时连接”则是指进入虫洞和离开虫洞的时刻都可以视为 t ，这样做的条件是相比于 L 的长度，虫洞的长度和因此穿越虫洞所需的时间都可以忽略。

(2) 设法在虫洞的入口和出口之间产生一个时间差

这至少有两种方法可以做到。一是利用狭义相对论，狭义相对论中的时钟延缓效应告诉我们，高速运动的物体会发生时钟变慢的结果，可以通过让出口相对于入口做高速运动后返回，从而产生时间差；二是利用广义相对论，广义相对论告诉我们引力场能产生时钟延缓效应，我们可以通过将出口置于与入口不同的外部引力场中，来实现这个时间差。也许还有其他方法，假定

所产生的时间差为 T ，则这一步完成时虫洞所连接的两条世界线将成为 $(t, 0, 0, 0)$ 和 $(t+T, 0, 0, L)$ ，如图 3-17(b)所示。

(3) 将虫洞出入口之间的距离 L 缓慢地缩小，直至接近零

这一步完成后，虫洞所连接的两条世界线将变成 $(t, 0, 0, 0)$ 和 $(t+T, 0, 0, 0)$ ，如图 3-17(c)所示。这一步并非必需，而且并非一定得让距离 L 接近于零。事实上，距离 L 只要小于时间差 T 就可以。

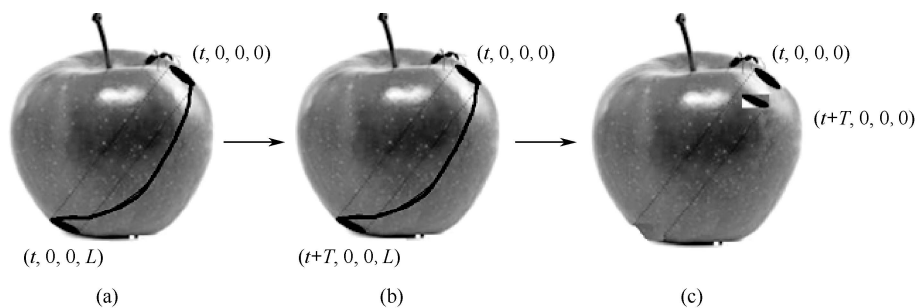


图 3-17 构建时间机器的三个步骤

由上述三个步骤所构筑的连接 $(t, 0, 0, 0)$ 和 $(t+T, 0, 0, 0)$ 的虫洞就是一种时间机器，因为由入口往出口方向穿越这一虫洞会跨越幅度为 T 的时间，由出口往入口方向穿越这一虫洞也会跨越幅度为 $-T$ 的时间。因此，这一时间机器既可以通向未来，也可以重返过去。

二、时间机器引起的悖论

对于科幻作家来说，能用虫洞构筑时间机器实在是提供了极大的想象空间，一时间穿越剧盛行，我们可以穿越到未来看看（未来究竟怎么样，当然谁也不知道，但是可以极大地发挥想象力，剧本也就更加神乎其神），也可以穿越回古代，中国的影视剧《步步惊心》就讲述了女主人公穿越回清朝，差点影响九子夺嫡的故事。

但是时间机器要建立在科学的土壤里才更让人信服。如果建立一个虫洞，它的两个洞口分别在地球上和宇宙飞船上，然后人乘坐这个飞船去旅行，在宇宙空间高速运动，最后返回。时间机器会让人重返过去，结果是，人在 12:00 点走进虫洞口，但他还没进去，就看见自己从飞船的那个虫洞口出来，也许那时才 10:00 点，乘坐飞船返回并从飞船上下来了。这看起来不可思议，可利用狭义相对论和广义相对论研究，似乎这样的机器能造得出来。

构建时间机器就一定会出现闭合类时线，此类时线就是四维时空中的一个曲线，闭合类时线是指类时线转一圈又回到原点，这个原点不仅是空间的原点，同时也是时间的原点。

然而时间机器却引发了无穷无尽的悖论。如“外祖母悖论”：一个人重返过去，杀死了自己的外祖母，就没有了母亲，也没有了自己，那么这名时间旅行者还能重返过去吗？如果不能，又是怎么杀死自己外祖母的呢？“外祖父悖论”：一个人通过时间旅行回到过去，杀死了自己的外祖父，娶了自己的外祖母，那么他到底是谁？“时空转移”：爱因斯坦在 1924 年第二次世界大战之前，见到了刚从监狱里出来的希特勒，实体与虚体的一次握手，让希特勒消失，那么历史不就被更改了吗？

三、解决悖论的方法

这些悖论是如此棘手，以至于在很长的时间里，时间机器被多数物理学家视为幻想领域的东西，而非严肃课题。

1. 霍金的观点

霍金等很多科学家认为，有可能存在虫洞，能够改变时空拓扑，但“时间机器”不一定能被制造出来。他说：“自然憎恶时间机器 (Nature abhors a time machine)”，用学术术语来说，霍金的立场称为“时序保护假设”。前文我们说

过，构建时间机器就一定会出现闭合类时线。霍金认为，一定有一个物理规律不允许闭合类时线出现，不允许一个人回到自己的过去，也不允许把自己的信息传递到过去，通俗地说，就是认为时间机器起码在宏观尺度上是不存在的。

因此，霍金提出诘难：“倘若时间机器的构筑是可能的，那为什么我们从未遇到过来自未来世界的时间旅行家呢？”这个诘难的潜台词是：我们从未遇到过来自未来世界的时间旅行家，最有可能的原因是时间机器在整个时间长河中——也就是永远——都不曾被构筑过，而这背后最有可能的原因则是时间机器的构筑是不可能的。但假如时间机器不能让人重返它被构筑之前的年代，霍金的诘难就不攻自破了，我们也就不一定要得出这么悲观的猜测了。

霍金的话看起来很有道理。比如，我们生活中很多事情一次只能允许一个结果，高考考了多少分就是这样，如果在考场上有题目做不出来，赶紧把信息发回自己的过去，咨询老师怎么解，再把信息发回来，那么大家都能考上名牌大学了，所以一定有一个物理规律能够阻止他，不能回到过去，也不能把信息传回到过去。

从构造时间机器的标准方案中不难看出，这种时间机器所能让人重返的“过去”不是完全任意的，它必须晚于虫洞被构筑成时间机器的时刻。这一结论，即时间机器不能让人重返它被构筑之前的年代，被认为有可能是普遍成立的。

2. 赵峥的观点

北京师范大学赵峥教授猜想，那个阻止回到过去的规律就是热力学第二定律。热力学第二定律告诉我们：自然过程总是由熵小向熵大的过程进行的（熵增原理），即自然过程是不可逆的。“君不见，黄河之水天上来，奔流到海不复回；君不见，高堂明镜悲白发，朝如青丝暮成雪。”“落叶永离，覆水难收。欲死灰之复燃，艰乎为力；愿破镜之重圆，冀也无端。”时间之河也只能往前发展，

不能够转回来，因此霍金的时序保护机制可能就是热力学第二定律。

3. “自激效应”的观点

然而，相对论的研究，以及索恩等人对构建时间机器的方案等的研究，至少在理论上使我们找到了构建时间机器的方法，这该如何解释呢？美国物理学家沃尔德和杰罗奇提出了一种可能性，被称为“自激效应”，那就是虫洞一旦被构建成时间机器，就会在构建成功的一瞬间自动毁灭，因为在那一瞬间，任何细微的辐射都可以通过虫洞返回过去，与它自身相叠加。这种叠加过程可以在零时间内重复无穷多次，从而产生毁灭性的自激效应。这种自激效应的假设并没有得到索恩本人的认同，所以时序保护假设的研究还在进行中。

4. 平行宇宙的观点

为解释所谓“外祖母悖论”等，又可引入相关却不同的另一方面的研究——平行宇宙和多维空间。如果一个旅行家回到过去改变历史，那么时间线便出现了分叉，而分叉出来的时间线则展开另一段历史。在另外的历史中，外祖母依然存在。平行宇宙理论最初是为了回到过去干预历史，导致对因果律的破坏而提出来的。但是，现在人们也可以从某些物理学中找到一些微弱的支持，比如从量子力学的某些效应中给出一些解释。

我们知道量子力学是物理学家研究微观世界的方法，从1900年普朗克提出能量量子化以后，量子力学研究和观点逐渐被证实是研究微观粒子所必需的观点，它的核心理论是，大自然在微观世界中是不连续的，这和牛顿的经典力学的理论截然相反。

1994年，牛津大学的大卫·多伊奇在《科学美国人》杂志发表论文《时间旅行的量子物理》，对时间旅行的物理上的可能性做了阐述。他认为，这种可能性是以量子力学的多世界理论为基础的，因为在亚原子的世界里，量子的不确定性占主导地位。一个电子撞击一个质子，既可能转向左边也可能转

向右边，而这种不确定性很可能造就了宇宙的多重性。根据多世界理论的解释，宇宙一开始就有无数多个平行的世界，似乎有了平行宇宙的概念，时空旅行改变历史就可以得到协调和解决，因此现在可以看到越来越多描写穿越的时空旅行的电影中，用平行宇宙的观点来修补出现的矛盾。有了平行宇宙的概念，时间机器更可以大胆前进了。

这些前沿研究还没有定论，很多细节可能还有推敲余地，很多结果可能还有改进空间，很多近似还有待突破，很多线索还有待探讨，或者说还没有实验验证，但结果值得期待。以前文我们讲的英国科幻作家威尔斯的科幻小说《时间机器》中的句子作为这个话题的结束语吧！

“人们除了惊叹别无选择，他，还会回来吗？他可能已经飞往过去，掉到了侏罗纪奇形怪状的爬行动物之间，或者掉到了旧石器时代茹毛饮血的野蛮人中间；或者他会不会往前飞呢？飞往一个较近的时代，在那个时代人还是人，但我们可以找到自己时代不解之谜的答案，令人厌烦的难题得到解决；或者飞进了人类的成年期，如果真是这样，我们还得若无其事地活下去，但对我来说，未来依旧是苍茫的，是一个巨大的未知数，只有偶然的几处，被它那难忘的故事所照亮！”

参考文献

- [1] 赵凯华. 定性与半定量物理学. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [2] 卢昌海. 那颗星星不在星图上. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [3] 赵峥. 物含妙理总堪寻. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [4] 赵峥. 看不见的星. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [5] 卢昌海. 从奇点到虫洞. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [6] 李淼. 《三体》中的物理学. 成都: 四川科学技术出版社, 2015.
- [7] 张天蓉. 宇宙之谜. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [8] 百度百科. <https://baike.baidu.com>.

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888

传 真：（010）88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

